

Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura

Oficina Regional
de Ciencia
para América Latina
y el Caribe

Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones



Guillermo A Lemarchand
y Gonzalo Tancredi (eds.)



Tópicos especiales en ciencias básicas e ingeniería - vol. 1



Oficina Regional
de Ciencia
para América Latina
y el Caribe

Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones

**Guillermo A. Lemarchand
y Gonzalo Tancredi (eds.)**

Tópicos especiales en ciencias básicas e ingeniería - vol. 1

Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe
Edificio MERCOSUR
Dr. Luis Piera 1992
11200 Montevideo, Uruguay
Tel. (598) 2413 2075
Fax: (598) 2413 2094
e-mail: montevideo@unesco.org.uy
web: www.unesco.org.uy

Primera edición: diciembre de 2010

ISBN 978-92-9089-163-5

Diseño de tapa: María Noel Pereyra
Diseño de interior: Silvia Diez
Revisión de textos: Mariana Martínez

Diseño artístico de la tapa: Marcelo Luis Bonfanti
La concepción artística de la tapa incluye una versión imaginaria en la cual se representa un código genético de triple hélice para indicar otras posibles biologías en el universo.

Dedicado a Frank D. Drake inspirador de varias generaciones de científicos, que trabajaron y trabajan buscando evidencias que demuestren que la vida puede llegar a ser un fenómeno cósmico y al 50 aniversario de su Proyecto OZMA, que inauguró la búsqueda radioastronómica de vida inteligente en el Universo.

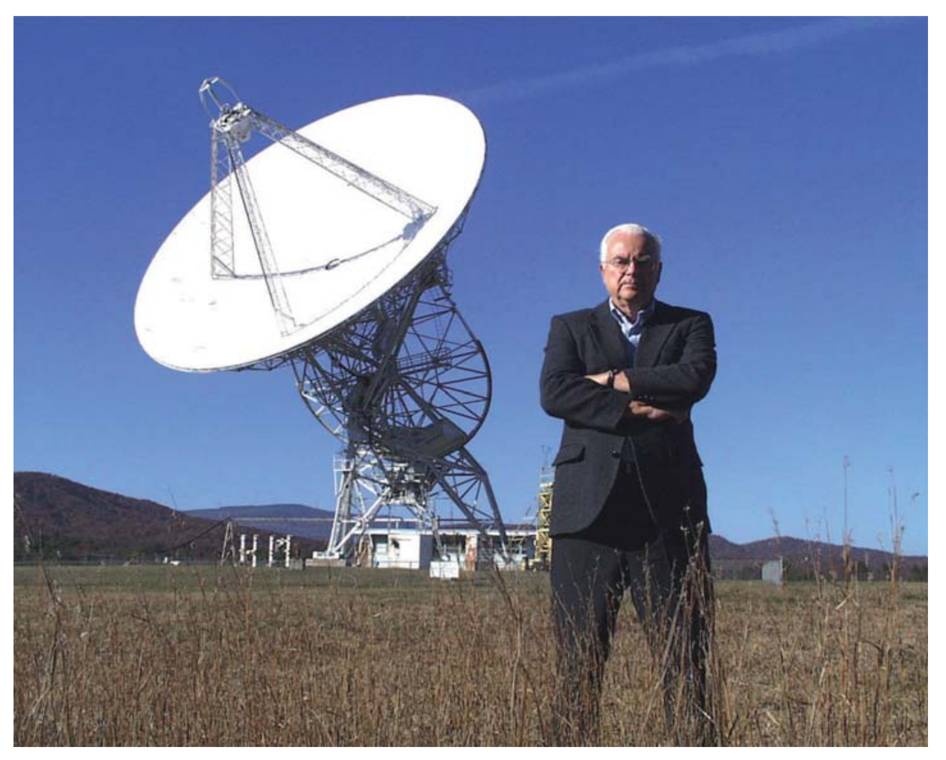


Foto: Cortesía de NRAO © 2010

Segunda Escuela de Posgrado Iberoamericana de Astrobiología
7-11 de septiembre de 2009 - Montevideo, Uruguay

Comité Organizador Científico (SOC)

Julián Chela-Flores, International Centre of Theoretical Physics, Trieste, Italia

Frank D. Drake, SETI Institute, Mountain View, EEUU

Julio A. Fernández, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay

Álvaro Giménez, Director, Centro de Astrobiología de Madrid (INTA-CSIC), España

Guillermo Giménez de Castro, McKenzie University, Brasil

Jordi Gutiérrez, Universitat Politécnica de Catalunya, España

Antonio Lazcano Araujo, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México

Guillermo A. Lemarchand, Universidad de Buenos Aires, Argentina y Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe, Uruguay (Presidente)

Pablo Mauas, Instituto de Astronomía y Física del Espacio (CONICET) Argentina

Eduardo Mizraji, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay

Rafael Navarro González, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México

Adriana Ocampo, NASA Headquarters, EEUU

Gustavo Porto de Mello, Universidade Federal do Rio de Janeiro, (UFRJ), Brasil

Juan G. Roederer, University of Alaska-Fairbanks, EEUU

Antígona Segura, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México

Comité Organizador Local (LOC)

Andrea Sánchez, Departamento Astronomía, Facultad de Ciencias, UDELAR, Uruguay

Gonzalo Tancredi, Departamento Astronomía, Facultad de Ciencias, UDELAR, Uruguay

Lenín Henríquez, Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe.

Leda Sánchez, Departamento Geología, Facultad de Ciencias, UDELAR, Uruguay

Jean Philippe Gibert, Departamento Paleontología, Facultad de Ciencias, UDELAR, Uruguay

Mariana Martínez, Observatorio Astronómico Los Molinos, MEC, Uruguay

Álvaro Cabana, Facultad de Ciencias, UDELAR, Uruguay



Participantes de la Segunda Escuela de Posgrado en Astrobiología (Montevideo, 7 al 11 de septiembre de 2009)

Prólogo

En septiembre de 2009, el Programa de Ciencias Básicas e Ingeniería (SC BES) de la Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe, organizó, junto a la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República (UDELAR) y el auspicio de la Academia de Ciencias de los Países en Desarrollo (TWAS), la Organización de Estados Americanos (OEA), el Instituto de Física Teórica Abdous Salam (ICTP), e instituciones como Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), el Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA) y la Dirección de Innovación, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (DICYT) de Uruguay, la *Segunda Escuela de Posgrado Iberoamericana de Astrobiología: Del Big Bang a las civilizaciones*.

Esta importante escuela de posgrado, que reunió casi una veintena de destacados profesores de renombre internacional y más de 60 estudiantes representando a 15 países de Iberoamérica coincidió con la celebración de un conjunto de aniversarios que conmemoraron importantes hitos en la historia de la ciencia. Éstos últimos cambiaron para siempre nuestra visión del universo y de la vida en él.

Por un lado, se cumplieron 400 años desde que Galileo Galilei utilizó por primera vez el telescopio para observar el cielo, y también 400 años desde la publicación de *Astronomía Nova*, por Johannes Kepler, en donde se propuso acertadamente, la audaz hipótesis que los planetas orbitan en forma elíptica. En un solo año nuestra posición en el cosmos cambió para siempre. En 1609, Galileo descubrió que nuestra luna tenía cráteres y montañas, nuestro sol manchas que variaban su tamaño con el tiempo, que la llamada Vía Láctea estaba conformada en realidad por millones de estrellas. Galileo descubrió, con su flamante telescopio, que Júpiter tenía cuatro lunas orbitando a su alrededor y Saturno anillos. Estas observaciones publicadas en su Siderius Nuncius (El Mensajero Sideral) demostraron contundentemente que la visión Aristotélica del mundo, dominante por más de dos mil años, era completamente incorrecta.

El cosmos concebido así por figuras de la talla de Copérnico, Galileo, Kepler y más tarde Newton, detallaba con mayor precisión la descripción del universo. Galileo desarrolla el método experimental y con él nace la ciencia moderna, desencadenando la Revolución Copernicana. Una nueva manera de articular la visión de la naturaleza que persistió sin cambios hasta principios del siglo XX. En solo cuatro siglos, nuestro conocimiento del cosmos en que vivimos expandió sus fronteras hasta límites jamás imaginados.

Términos como Big Bang, agujeros negros, materia oscura, exoplanetas, cuásares, pulsares, suelen poblar las noticias habituales de los periódicos. Vivimos en una época en donde nuestro conocimiento y tecnología disponible nos permite comenzar a especular acerca de la vida en otros mundos.

La Organización de las Naciones Unidas, a través de la UNESCO, siguiendo una propuesta de la Unión Astronómica Internacional declaró al 2009 como Año Internacional de la Astronomía. Un año especial en el cual la UNESCO, en cooperación con otras organizaciones, ha apoyado actividades para que los habitantes del planeta Tierra, en especial los jóvenes, adquieran más consciencia acerca de las maravillas del universo en el cual estamos insertos.

Debemos señalar que durante el 2009, también, se celebraron 200 años desde que Jean Baptiste Lamarck editó su libro *Philosophia Zoologica* en donde expone una primera teoría de evolución, ese mismo año nace Charles Darwin, quien con la publicación de *"El Origen de las Especies"* exactamente 50 años después revolucionó completamente la biología proponiendo un mecanismo de evolución por selección natural y estableciendo un paradigma que permanece vigente hasta nuestros días.

La poderosa visión de Darwin sirvió para fundamentar y articular hallazgos en la paleontología, ecología, genética de poblaciones, biología molecular, biología del desarrollo, genómica y hasta fundamentar los principios de la sociobiología.

El paradigma de la selección natural explica con un mismo mecanismo la naturaleza de la vida que se manifiesta en distintos niveles de organización, del molecular al social. Nuevamente, otra mente brillante, la de Darwin, produce un cambio fundamental de nuestra visión de la naturaleza. Desde entonces nuestra percepción de la vida como fenómeno natural adquiere una noción mucho más sutil y totalizadora.

No hay duda, que estos aniversarios que vinculan los 400 años del uso del telescopio para observar el universo y los 150 años de la teoría de evolución por selección natural, encierran las claves para un próximo gran descubrimiento que cambiará substancialmente nuestra manera de percibir el universo: "el descubrimiento de la primera evidencia que existe vida en otros mundos".

No podemos dejar de mencionar que hace 40 años el comandante Neil Armstrong fue el primer miembro de la especie *Homo sapiens*, que pisó la superficie de otro mundo, la Luna. Parafraseándolo, definitivamente fue un pequeño paso para un hombre pero un gran salto para nuestra humanidad…

Finalmente, también durante el 2009, se cumplieron 10 años desde la *Primera Escuela Iberoamericana de Astrobiología*. Esta fue oportunamente organizada en la ciudad de Caracas, por Julián Chela-Flores, Guillermo A. Lemarchand y el desaparecido pionero de los estudios de origen de la vida, Joan Oró. En aquella oportunidad también se había contado con el apoyo de la UNESCO, el Centro de Física Teórica de Trieste y la Academia de Ciencias de los Países en Desarrollo.

Una década después, muchos de los estudiantes de aquella *primera escuela*, concurrieron a la segunda escuela en carácter de "profesores", otros se encuentra dirigiendo ya sus propios grupos de investigación y algunos han llegado a la dirección de centros de investigación en la región. Estos hechos muestran tibiamente los resultados invisibles que se pueden generar, en el largo plazo, en una reunión con las características de la escuela de posgrado organizada por nuestra Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe.

Es para mí un verdadero honor, presentar la publicación de las clases de la *Segunda Escuela de Posgrado Iberoamericana de Astrobiología* e inaugurar con este volumen la nueva colección "Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería". Esta nueva serie, bajo el formato de libro de texto, compilará cada una de las escuelas de posgrado que el Programa de Ciencias Básicas e Ingeniería de nuestra oficina organiza anualmente.

Confiamos que este tipo de programas, que implementa nuestra oficina regional de ciencias, permita establecer estrechos vínculos con la comunidad científica y utilizar informaciones obtenidas gracias a la labor científica en la creación de nuevas capacidades en los países.

Por medio de ellas se hace hincapié en las conexiones y el fortalecimiento de los centros de excelencia existentes, especialmente en el Sur, así como en el fortalecimiento de la participación de las mujeres y los jóvenes. Se promueve, también, la estrecha colaboración interdisciplinaria y una cultura de la enseñanza de las ciencias en todos los niveles que es un objetivo primordial de nuestra organización.

Jorge Grandi,
Director
Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO
para América Latina y el Caribe
Montevideo, noviembre de 2010.

Prefacio

En 1999, el Centro Internacional de Física Teórica Abdus Salam (ICTP), el Centro Internacional para Ingeniería Genética y Biotecnología (ICGEB), ambos localizados en Trieste (Italia) y el Rectorado de la Universidad Simón Bolívar de Venezuela (USB), bajo la dirección de Julián Chela-Flores, G.A. Lemarchand y Joan Oró, organizaron la *Primera Escuela Iberoamericana de Astrobiología* (28 de noviembre – 8 de diciembre, Caracas, Venezuela). El evento contó con el auspicio de la Academia de Ciencias de los Países en Desarrollo (TWAS), UNESCO, NASA y la Agencia Espacial Europea (J. Chela-Flores, G. A. Lemarchand y J.Oró, eds., *Astrobiology: Origins from the Big Bang to Civilisation*, Kluwer Academic Pub., 2000).

Esta primera escuela de graduados fue un verdadero éxito y muchos de los estudiantes que participaron en ella, una década después se encuentran liderando grupos de investigación de avanzada, relacionados con la Astrobiología.

Con motivo de celebrarse el Año Internacional de la Astronomía (IYA 2009) y el bicentenario del nacimiento de Charles Darwin (Darwin 200), la Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe y la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República, asumieron la responsabilidad de organizar la *Segunda Escuela Iberoamericana de Astrobiología: Del Big Bang a las Civilizaciones*, entre el 7 y 12 de septiembre de 2009, en la ciudad de Montevideo, Uruguay.

La segunda escuela contó con el patrocinio de la Organización de Estados Americanos (OEA), TWAS, ICTP, el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR) y de tres prestigiosas instituciones del Uruguay: el Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA), la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República y la Dirección de Innovación, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (DICYT) del Ministerio de Educación y Cultura (MEC).

Se considera a la astrobiología como el estudio de los orígenes, evolución, distribución y futuro de la vida en el universo. Sus áreas de investigación incluyen el desarrollo de conceptos fundamentales acerca de la vida y entornos habitables que ayudan a reconocer biosferas extraterrestres que podrían llegar a ser muy distintas a la de la Tierra. La astrobiología abarca la búsqueda de exoplanetas potencialmente habitados, la exploración de Marte y los pla-

netas exteriores y sus satélites, y las investigaciones teóricas y experimentales acerca de los orígenes y la evolución temprana de la vida, los procesos que pueden afectar el desarrollo de la vida como los impactos o las radiaciones, así como el potencial de la vida para adaptarse a los retos del futuro de la Tierra.

La búsqueda de vida en el universo es una línea de investigación interdisciplinaria que combina conocimientos de física, astronomía, biología, geología, ciencias de la atmósfera, hidrología, ingeniería, ecología, ciencias cognitivas, sociología y filosofía.

Durante la segunda escuela de graduados, los estudiantes participantes tuvieron la posibilidad de estar en contacto con científicos regionales e internacionales, expertos en temas de vanguardia relacionados con la astrobiología y con colegas de distintos lugares de Iberoamérica.

Durante una semana, alrededor de 70 estudiantes, pertenecientes a 14 países, participaron junto a 16 profesores provenientes de Argentina, Brasil, España, Estados Unidos, México y Uruguay. Las temáticas abordadas incluyeron los siguientes tópicos: (1) Introducción a las nuevas teorías sobre el origen y la evolución del universo; (2) estudios sobre la evolución química de nuestra galaxia; (3) búsqueda de estrellas que se identifican como análogos solares; (4) origen y evolución de sistemas planetarios; (5) búsqueda de exoplanetas; (6) evolución de atmósferas planetarias y signos de biomarcadores; (7) impactos de cuerpos menores y su papel en la evolución de la vida en la Tierra; (8) zonas de habitabilidad en sistemas extrasolares; (9) cosmoquímica, evolución y el origen de la vida en la Tierra; (10) la búsqueda de vida en el Sistema Solar; (11) bases biológicas para el estudio de la evolución de la vida en el universo; (12) el estudio de ambientes extremos para la vida: Extremófilos; (13) origen y evolución de sistemas cognitivos; (13) búsqueda de señales extraterrestres artificiales (en los rangos de radio y óptico): Proyecto SETI; (14) vida media de las civilizaciones tecnológicas en la galaxia y (15) las implicancias filosóficas de la búsqueda de vida extraterrestre.

Además de las clases magistrales y las profundas discusiones entre estudiantes y profesores, en forma simultánea a la *escuela,* se realizaron un conjunto de actividades complementarias que tuvieron un gran impacto. Por un lado, se organizó la presentación de trabajos originales de investigación, en formato de posters acompañados de presentaciones breves, para que los estudiantes tuvieran la oportunidad de mostrar y compartir con sus colegas. Por otro, se organizaron cuatro conferencias públicas a saber: (1) *"Vida en el Universo"* por el destacado biólogo mexicano Antonio Lazcano, realizada en el Palacio de la Intendencia Municipal de Montevideo; (2) *"El Origen del Universo"* por

el físico brasilero Martín Makler, en el Planetario de la Ciudad de Montevideo, (3) *"El descubrimiento de los planetas extrasolares y nociones de la vida en ambientes extremos"* por Álvaro Giménez y Ricardo Amils, del Centro de Astrobiología de Madrid, en el ámbito del Centro Cultural de España y (4) *"La búsqueda de inteligencias extraterrestres"* una teleconferencia de Frank D. Drake desde EEUU, dictada en el aula magna de la Facultad de Ciencias (UDELAR). Un nutrido público asistió a cada una de las cuatro conferencias, indicando el alto interés general en estas temáticas.

Finalmente, en coordinación con las respectivas Inspecciones de Astronomía y Biología de Enseñanza Secundaria, las Asociaciones de Profesores de Astronomía y de Biología del Uruguay, y el Sector de Educación de la Oficina de la UNESCO en Montevideo, se organizó un *"Taller sobre Vida en el Universo para Docentes de Ciencias"*. En él participaron más de doscientos profesores y maestros de ciencias de todo el Uruguay y algunos representantes de Argentina, Brasil y Colombia. Su objetivo fue mostrar diferentes abordajes que pudieran enriquecer las actividades de enseñanza de todas las ciencias, utilizando la atracción natural sobre los jóvenes, que genera la búsqueda de vida en el Universo.

En este volumen se publica la mayoría de las clases magistrales desarrolladas durante la segunda escuela de astrobiología. La edición preparada por cada uno de los autores, sintetiza muy bien los contenidos vertidos durante las distintas presentaciones realizadas. Sin embargo, debido a las nutridas agendas de algunos de los profesores que participaron, no ha sido posible incluir las clases magistrales correspondientes a Ricardo Amils *(Interés astrobiológico de los ambientes terrestres extremos: el caso del Río Tinto)*, Frank D. Drake *(SETI en los Estados Unidos)*, Álvaro Giménez *(Planetas extrasolares: la búsqueda de otros mundos habitables)*, Martín Makler *(Alquimia cósmica: del Big Bang al origen de los elementos químicos)*, y Felisa Wolf-Simon *(Los microbios y las cuatro estrategias básicas para la vida en la Tierra).*

Para subsanar parte de estas carencias, hemos añadido un capítulo sobre búsquedas de exoplanetas, escrito por Andrea Sánchez, astrónoma de la Universidad de la República e integrante del Comité de Organización Local de la Segunda Escuela Iberoamericana de Astrobiología.

A lo largo de las distintas presentaciones, una interesante dialéctica fue establecida, entre aquellos estudiantes y profesores de formación en ciencias biológicas y otros en ciencias físicas y astronómicas. Los primeros argumentaban sobre la alta improbabilidad de que la vida en otros mundos desarrolle inteligencia. Los segundos consideraban, dada las escalas cósmicas, con tiem-

po suficiente, en un ambiente adecuado, tarde o temprano, la vida encontraría los caminos para desarrollar civilizaciones tecnológicas. Luego, éstas podrían eventualmente ser detectadas a través de observaciones astronómicas. Este tipo de debates se vienen repitiendo desde la época del Alfred Wallace (1823-1913), co-descubridor de la teoría de evolución por selección natural.

Dada su pertinencia, nos pareció apropiado incluir, en este volumen, por primera vez en español, la transcripción de un debate que sobre este mismo tema, entablaron oportunamente dos celebridades científicas del siglo XX: Ernst Mayr (1904-2005) biólogo evolucionista, profesor de zoología de la Universidad de Harvard y Carl Sagan (1934-1996), profesor de astronomía de la Universidad de Cornell. Este debate fue organizado, originalmente, por uno de nosotros (GAL) y fue publicado, en las páginas de *Bioastronomy News,* en el año 1995. Agradecemos a *The Planetary Society* (Pasadena, EEUU) por habernos cedido los derechos para incluir la versión completa de este debate en español.

Cuando este volumen ya estaba camino a la imprenta, uno de los profesores de la escuela, resultó ser la responsable del descubrimiento astrobiológico más importante de la década. La Dra. Felisa Wolf-Simon, del Instituto de Astrobiología de la NASA y de la Universidad de Arizona, condujo una investigación cuyos resultados están cambiando las nociones tradicionales acerca de los límites de la vida en la Tierra. De los elefantes a las bacterias, todas las formas de vida en la Tierra dependen de los mismos seis elementos: oxígeno, carbono, hidrógeno, nitrógeno, fósforo y azufre. El paradigma aceptado asumía que la química de la vida es tan específica que cualquier cambio en ella también cambiaría la estabilidad molecular y la reactividad, lo que impediría su propia continuidad. Felisa y su equipo encontraron una cepa bacteriana llamada GFAJ-1, que puede sustituir el fósforo en sus propias moléculas de ADN por el arsénico, un legendario veneno. El fósforo, en forma de compuestos de fosfatos, constituye la columna vertebral de las hebras de ADN y el ARN, así como ATP y NAD, dos moléculas clave para la transferencia de energía en una celda. Por otra parte el arsénico se encuentra justo debajo del fósforo en la tabla periódica y tiene propiedades químicas similares. De hecho, su gran toxicidad para las personas y la mayoría de las formas de vida, surge cuando las células intentan utilizar arsénico en lugar de fósforo.

La primera consecuencia de este trabajo muestra que es posible encontrar formas de vida muy diferentes a las que conocemos. La cepa GFAJ-1, al desarrollarse en un ambiente inhibido de fósforo y rico en arsénico, fue capaz de sustituir todo el fósforo presente en la molécula de su ADN por arsénico

y garantizar con esta sustitución, su crecimiento y multiplicación. Este descubrimiento abre nuevas ventanas de investigación para encontrar formas de vida muy distintas a las conocidas, tanto en ambientes extremos terrestres como en ambientes extraterrestres. Las implicaciones de este descubrimiento son enormes.

Es con gran placer, anunciar que durante el verano boreal del año 2011, el Prof. Jordi Gutiérrez, de la Universidad Politécnica de Catalunya, tendrá la responsabilidad de coordinar la organización de la Tercera Escuela Iberoamericana de Astrobiología, que se desarrollará en la ciudad de Barcelona.

Teniendo en cuenta lo sucedido en las dos oportunidades precedentes, estamos convencidos que esta tercera escuela, será sin duda alguna muy exitosa. Se garantizará, así, la creciente participación Iberoamericana, en un área de vanguardia de la ciencia, como es la astrobiología.

Guillermo A. Lemarchand
Gonzalo Tancredi
Editores
Montevideo, diciembre de 2010

Agradecimientos

La publicación de la nueva colección *"Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería"*, ha sido posible merced al constante apoyo y entusiasmo de Jorge Grandi, Director de la Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe, quién además contribuyó con el prólogo.

La preparación de este primer volumen de la colección, dedicado a la Astrobiología, ha sido posible merced a la colaboración desinteresada de un conjunto de destacadas figuras internacionales en el campo de la ciencia como: César Bertucci del Instituto de Astronomía y Física del Espacio (Conicet, Argentina); Julio A. Fernández de la Facultad de Ciencias, UDELAR, Jordi L. Gutiérrez de la Universidad Politécnica de Barcelona; Marcelo I. Guzmán, de la Universidad de Kentucky; Antonio Lazcano de la Facultad de Ciencias, UNAM; Alicia Massarini de la Universidad de Buenos Aires y del Conicet; Eduardo Mizraji de la Facultad de Ciencias, UDELAR; Antígona Segura del Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM; Gustavo Porto de Mello de la Universidad Federal de Rio de Janeiro, Andrea Sánchez Saldías de la Facultad de Ciencias, UDELAR. No solo participaron como profesores de la escuela sino que también se tomaron el tiempo necesario para preparar su respectivo capítulo para este libro. Es importante señalar aquí, la disposición de Charlene Anderson de *The Planetary Society*, en proveer la autorización correspondiente para traducir y reproducir por primera vez en español, el debate completo entre Ernst Mayr y Carl Sagan realizado en 1995.

El contenido de este volumen se vio enriquecido, merced a la entusiasta participación durante la *Segunda Escuela Iberoamericana de Astrobiología* de Ricardo Amils Pibernat del Centro de Astrobiología de Madrid; Frank D. Drake del SETI Institute; Álvaro Giménez, Director del Centro de Astrobiología de Madrid; Martín Makler del Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas y de Felisa Wolfe-Simon, notable astrobióloga de la Universidad de Arizona y del Programa de Astrobiología de la NASA.

Se debe destacar aquí la valiosísima e importante tarea de edición y normalización de los manuscritos, llevada a cabo por Mariana Martínez Carlevaro, estudiante de la Facultad de Ciencias de UDELAR, quien se desempeñó de forma sobresaliente. Agradecemos la profesionalidad de Silvia Diez, del Departamento de Publicaciones de la Oficina de la UNESCO en Montevideo, quien asumió la tarea de diseño, composición y corrección de los textos del libro. El diseño de la tapa fue realizado por María Noel Pereyra de la UNESCO, mientras que la composición artística de la misma, estuvo a cargo de Marcelo Luis Bonfanti, destacado artista espacial de la ciudad de Córdoba (Argentina). Queremos destacar la importante colaboración de Paula Santos, asistente del Programa de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UNESCO, colaborando con su trabajo la tarea de publicación de este libro.

Dos figuras muy importantes fueron responsables de facilitar la realización de la *Segunda Escuela Iberoamericana de Astrobiología*. Ellos son: Julián Chela-Flores del Centro de Física Teórica Abdous Salam (ICTP) de Trieste y Adriana Ocampo, de la División de Exploración del Sistema Solar de la NASA en Washington, DC. Su ayuda constante y sabios consejos fueron de vital importancia. También queremos expresar nuestro agradecimiento al resto de los miembros

del comité científico internacional por sus valiosas sugerencias: Guillermo Giménez de Castro de la Universidad McKenzie de San Pablo, Brasil; Pablo Mauas del Instituto de Astronomía y Física del Espacio y Juan G. Roederer, de la Universidad de Alaska.

Asimismo debemos destacar el intenso trabajo desarrollado por el Comité de Organización Local (COL) integrado por Andrea Sánchez Saldías, Mariana Martínez Carlevaro, Lenín Henríquez, Leda Sánchez Bettucci, Álvaro Cabana y Jean Philippe Gibert y aquellos que se fueron incorporando como Herbert Cucurullo.

Queremos señalar el excelente trabajo organizativo realizado por los miembros del Comité Organizador del Taller para Docentes de Ciencias: Reina Pintos y Alfredo Santos de la Inspección de Astronomía (Consejo de Enseñanza Secundaria), Eduardo Fiore de la Inspección de Biología (Consejo de Enseñanza Secundaria), Karina Azambuya de la Asociación de Profesores de Astronomía del Uruguay, María Isabel Iriart de la Asociación de Profesores de Biología de Uruguay. Se debe señalar también la destacada participación en el taller de Sonia Scaffo, especialista en educación en ciencias de la UNESCO. La participación de docentes de todo Uruguay fue posible merced al apoyo recibido del Consejo de Enseñanza Secundaria.

Agradecer también a la Intendencia Municipal de Montevideo, al Planetario Municipal y al Centro Cultural de España por facilitar sus instalaciones para la realización de las Conferencias públicas.

Asimismo, queremos reiterar nuestro agradecimiento a las organizaciones que contribuyeron económicamente para la realización de la Escuela como la Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe, la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República; la Organización de los Estados Americanos (OEA); la Academia de Ciencias de los Países en Desarrollo (TWAS), el Centro de Física Teórica de Trieste (ICTP); el Instituto Argentino de Radioastronomía; PEDECIBA (Uruguay); la Dirección de Innovación, Ciencia y Tecnología del Ministerio de Educación y Cultura (Uruguay); la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República (Uruguay). Queremos destacar la contribución realizada tanto por el Centro de Astrobiología de Madrid (España), como por el Instituto de Astrobiología de la NASA (EEUU), facilitando la participación de sus representantes en la escuela.

En particular, es preciso señalar el apoyo recibido por parte de Mary Voytek del Programa de Astrobiología de la NASA en Washington; Álvaro Giménez, director del Centro de Astrobiología de Madrid; María Teresa Mahdavi de TWAS; Eleonora Crotta del ICTP; Lucrecia Zea-Yonker y Ana Farfan de la OEA, en facilitarnos la tarea de conseguir los patrocinios de sus respectivas instituciones.

Finalmente, queremos señalar nuestro más profundo agradecimiento a cada uno de los estudiantes que participaron en la escuela. Confiamos, que en un futuro próximo, alguno de ellos sea quien encuentre la primera evidencia de que existe vida más allá de la Tierra.

Índice

Capítulo 1

El debate entre Ernst Mayr y Carl Sagan acerca de la probabilidad de vida inteligente en el universo[1]

Resumen: Durante la *Segunda Escuela Iberoamericana de Posgrado en Astrobiología,* se suscitaron interesantes debates acerca de la probabilidad de existencia de seres inteligentes extraterrestres en el universo, entre los expertos del área biológica y del área física. Por esta razón, resulta apropiado reproducir por primera vez en español un debate sobre el mismo tema desarrollado entre Ernst Mayr y Carl Sagan en el año 1995. Dicho debate había sido organizado por Guillermo A. Lemarchand y publicado en las páginas de dos números consecutivos de *Bioastronomy News*. Aquí se reproduce el debate completo, incluyendo la introducción original.

Abstract: During the Second Iberoamerican Graduate School on Astrobiology interesting debates, between the experts from the biological and physical backgrounds, arose about the probability of the existence of extraterrestrial intelligent beings in the universe. For this reason, it is appropriate to reproduce –for the first time in Spanish- the debate on the subject conducted, in 1995, between Carl Sagan and Ernst Mayr. This debate was organized by Guillermo A. Lemarchand and published in the pages of two consecutive numbers of *Bioastronomy News*. Here we reproduce the complete debate, including its original introduction.

1 Este debate fue organizado y editado originalmente en inglés por Guillermo A. Lemarchand (GAL) en el año 1995. Apareció por primera vez en dos números sucesivos de *Bioastronomy News: Newsletter of the International Astronomical Union Commission 51*, vol. 7 (3) y (4), 1995, publicado en EEUU por The Planetary Society (www.planetary.org). En 1996 el debate también fue reproducido en forma completa en *The Planetary Report*, vol. XVI (3): 4-13, May/June 1996. Por el tipo de discusiones que tuvieron lugar entre profesores y estudiantes, a lo largo de la *Segunda Escuela Iberoamericana de Astrobiología*, se consideró muy apropiado reproducir este debate entre dos figuras emblemáticas de la ciencia del siglo XX como Ernest Mayr y Carl Sagan. Los argumentos esgrimidos hace 15 años, siguen representando muy bien las diferentes posiciones sobre la posibilidad de vida inteligente en el universo que asumen los representantes de las ciencias biológicas y físicas respectivamente. Esta es la primera vez que se publica el texto en lengua castellana. Agradecemos a The Planetary Society (Pasadena) por habernos dado la autorización de traducirlo y reproducirlo en las páginas de este libro. GAL

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G. (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería,* vol. 1, 1 - 22, © 2010 UNESCO-Montevideo.

1. Introducción

Desde que los primeros seres humanos levantaron la vista hacia los cielos, comenzaron a proyectar en ellos los fantasmas de sus mentes soñadoras. Si es que existe algún hilo conductor que une a los antiguos filósofos griegos y a los modernos científicos espaciales, es la incertidumbre acerca de la pluralidad de los mundos habitados en el universo. El vasto y antiguo cosmos que se despliega ante nosotros, se escapa más allá del entendimiento humano común y nos hace reflexionar acerca del significado último de la exquisita vida que florece en nuestro delicado planeta azul.

A través del desarrollo de la tecnología y nuestro entendimiento acerca de las leyes de la naturaleza, la humanidad se encuentra por primera vez en la historia, en una posición única capaz de corroborar o refutar mediante pruebas experimentales, la hipótesis acerca de la existencia de civilizaciones tecnológicas de origen extraterrestre. El programa SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) que nuestra civilización humana ha comenzado a desarrollar desde principios de la década del sesenta, en el sentido más profundo, es una búsqueda acerca de nuestros orígenes, para determinar qué posición ocupamos en la historia de la vida y el universo.

Asumimos que la vida es una consecuencia natural de las leyes físicas que actúan en ambientes propicios, y esta secuencia de procesos físicos –como sucedió en la Tierra– puede ocurrir en otros lugares (Principio de Mediocridad).

Los defensores de SETI argumentan que nuestra galaxia tiene cientos de miles de millones de estrellas, y que vivimos en un universo con miles de millones de galaxias, por lo que la vida debiera ser un acontecimiento común en este ámbito cósmico. Debe haber muchos planetas habitables, cada uno de ellos refugiando a su camada de seres vivos. Algunos de estos mundos habrían de desarrollar la inteligencia, la capacidad tecnológica e interés en comunicarse con otras criaturas inteligentes. Por medio de las ondas electromagnéticas, es posible establecer contacto a través de distancias interestelares e intercambiar información y sabiduría con el resto de los vecinos cósmicos. En estos instantes, alguna de las hipotéticas civilizaciones tecnológicas de origen extraterrestre podría estar transmitiendo una determinada firma electromagnética que seríamos capaces de reconocer a través de nuestras observaciones astronómicas.

Pero debido a que aún no hemos podido encontrar una sola evidencia concreta de inteligencia extraterrestre, ha surgido una batalla filosófica entre

los que podrían ser llamados *optimistas* del contacto con civilizaciones extraterrestres- que por lo general se adhieren a la visión ortodoxa de SETI - y los proponentes de la hipótesis de la singularidad, la cual sugiere que la Tierra es, probablemente, el único planeta en el cual la vida ha desarrollado una inteligencia superior capaz de generar tecnologías que permitirían la comunicación interestelar.

Aquí se presentan ambos lados del debate filosófico y científico. Primero, uno de los más prominentes especialistas en evolución del siglo XX, Ernst Mayr (1904-2005), del Museo de Zoología Comparada la Universidad de Harvard, presenta los principales argumentos de la hipótesis de unicidad. Mayr destaca que, la historia de la vida en la Tierra, presenta hechos acerca de la unicidad de la secuencia de eventos que permitió que la vida desarrolle la inteligencia. Deduce que la probabilidad de repetición de dichos eventos es despreciable lo que introduce un verdadero problema para SETI. Por otro lado, Carl Sagan (1934-1996) profesor del Departamento de Astronomía y Director del Laboratorio de Estudios Planetarios de la Universidad de Cornell, responde a los argumentos de Mayr y expresa la visión optimista.

¿Cuál de las dos posiciones será la más apetecible para su paladar? Continúe leyendo y decida por usted mismo.

Guillermo A. Lemarchand
Editor, Bioastronomy News
Junio de 1995

2. Es muy improbable que el proyecto SETI tenga éxito

Por Ernst Mayr

¿Cuál es la probabilidad de éxito del programa de búsqueda de inteligencia extraterrestre?

La respuesta a este interrogante depende de una serie de probabilidades. Hace unos años hice un análisis detallado de este problema en una publicación en alemán (Mayr 1992) y basada en ella, intentaré presentar aquí los hallazgos esenciales de dicha investigación. Mi metodología consiste en formular una serie de preguntas que analizan las probabilidades de éxito.

¿Cuán probable es que exista vida en otro lugar del universo?

Hasta los críticos más escépticos del proyecto SETI responderían a esta pregunta con optimismo. Las moléculas necesarias para el origen de la vida, tales como aminoácidos y ácidos nucleídos, han sido identificadas en el polvo cósmico, junto con otras macromoléculas, por lo tanto parecería bastante concebible que la vida pudiese originarse en algún otro lugar del universo.

Por otro lado, algunos de los modernos escenarios sobre el origen de la vida proponen un inicio a partir de moléculas aún más simples –un comienzo que hace que un origen de la vida independiente y múltiple sea un escenario aún más probable. Sin embargo, un escenario de origen de la vida independiente y múltiple, presumiblemente, resultaría en seres vivientes drásticamente diferentes a los de la Tierra.

¿En qué lugar podría esperarse encontrar vida como tal?

Obviamente, sólo en planetas. A pesar de que hasta hoy tenemos conocimiento certero sólo de los nueve planetas de nuestro sistema solar[2], no hay razón

2 NOTA DEL EDITOR: en el momento en que se escribió este artículo solo se habían descubierto planetas alrededor de "pulsares". La primera evidencia de planetas alrededor de estrellas tipo solar, aparecieron apenas unos meses después de la primera publicación de este artículo. En noviembre de 2010 ya se habían confirmado el descubrimiento de 497 planetas extrasolares o exoplanetas.

alguna para dudar de que en todas las galaxias deba haber millones sino miles de millones de planetas. El número exacto, por ejemplo, para nuestra propia galaxia, sólo podríamos intentar adivinarlo.

¿Cuántos de estos planetas podrían haber sido adecuados para el origen de la vida?

Evidentemente, existen grandes restricciones para la posibilidad de que la vida pueda originarse y mantenerse en un planeta. Éste debe contar con una temperatura promedio favorable; la variación estacional no debe ser muy extrema; el planeta debe estar a una distancia apropiada de su estrella central; debe tener una masa adecuada para que su gravedad sea capaz de mantener una atmósfera; la atmósfera debe tener una composición química adecuada para albergar formas de vida primitiva; debe tener la consistencia necesaria para proteger la nueva vida de la radiación ultravioleta y de otras radiaciones dañinas; y debe existir agua en dicho planeta. En otras palabras, todas las condiciones ambientales deben ser las adecuadas para propiciar el origen y el mantenimiento de la vida.

Solo uno de los nueve planetas de nuestro sistema solar tuvo la combinación adecuada de estos factores. Seguramente esto fue sólo una casualidad.

¿Qué fracción de planetas de otros sistemas solares tendrán una combinación igualmente adecuada de factores ambientales? ¿Será uno en 10, o uno en 100, o uno en 1.000.000?

El número que se elija dependerá del propio optimismo. Siempre resulta difícil extrapolar a partir de un solo caso conocido. Este número es, sin embargo, de suma importancia cuando se considera el limitado número de planetas que puede ser alcanzado a través de cualquiera de los proyectos de observación SETI que se desarrollan en la actualidad.

¿Qué porcentaje de planetas en los cuales se ha originado la vida producirán vida inteligente?

La respuesta que podrían dar los físicos, en su conjunto a esta pregunta, sería completamente diferente a la que darían los biólogos. Los físicos todavía tienden a pensar más determinísticamente que los biólogos. Tienden a decir: si la vida se ha originado en algún lado, también desarrollará inteligencia a su

debido tiempo. El biólogo, por otro lado, está impresionado por la improbabilidad de tal desarrollo.

La vida en la Tierra se originó alrededor de 3.800 millones de años atrás, pero la inteligencia avanzada no se desarrolló hasta hace cerca de medio millón de años atrás. Si la Tierra hubiese sido temporalmente enfriada o calentada en demasía durante esos 3.800 millones de años, la inteligencia nunca se habría desarrollado.

Al responder esta pregunta, uno debe ser consciente del hecho de que la evolución nunca se mueve en una línea recta hacia un objetivo ("inteligencia") como sucede durante un proceso químico o como resultado de una ley de la física. Las vías evolutivas son altamente complejas y se asemejan más a las bifurcaciones de las ramas de un árbol.

Después del origen de la vida, es decir, hace 3.800 millones de años, la vida en la Tierra estuvo conformada durante más de 2.000 millones de años únicamente por procariotas, simples células, sin un núcleo organizado. Estas bacterias y sus parientes desarrollaron seguramente 50 a 100 linajes diferentes (algunos quizás muy diferentes) pero, en este tiempo enormemente extenso, ninguna de ellas conllevó a la inteligencia. Debido a un único evento sorprendente que aún hoy está sólo parcialmente explicado, hace unos 1.800 millones de años, se originó la primera célula eucariota, una criatura con un núcleo bien organizado y otras características de organismos "superiores". Del rico mundo de los protistas (formados por una sola célula) se originaron eventualmente tres grupos de organismos multicelulares: hongos, plantas y animales. Pero ninguna de las millones de especies de hongos y plantas fue capaz de producir inteligencia.

Los animales (metazoos) se ramificaron en los períodos del Precámbrico y el Cámbrico en 60 a 80 linajes (filos). Sólo uno de ellos, el de los *cordados*, conllevó eventualmente a la inteligencia genuina. Los cordados son un grupo antiguo y bien diversificado, pero sólo uno de sus numerosos linajes, el de los vertebrados, produjo eventualmente la inteligencia. Entre los vertebrados, evolucionaron una serie completa de grupos – tipos de peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Nuevamente, sólo un linaje, el de los mamíferos, condujo a la inteligencia. Los mamíferos tuvieron una larga historia evolutiva que comenzó en el Período Triásico, hace más de 200 millones de años, pero fue en la última parte del Período Triásico -15 a 20 millones de años atrás- que la inteligencia superior se originó en uno de alrededor de 24 órdenes de mamíferos.

La elaboración del cerebro de los homínidos comenzó hace menos de 3 millones de años, y la de la corteza del *Homo sapiens* ocurrió hace solamente 300.000 años. Nada demuestra la improbabilidad del origen de la inteligencia superior mejor que los millones de linajes filogenéticos que no lograron conseguirla.

¿Cuántas especies han existido desde el origen de la vida?

Este número es motivo de especulación, tal como lo es el número de planetas en nuestra galaxia. Pero si hay 30 millones de especies vivientes, y si la expectativa de vida de una especie es de cerca de 100.000 años, entonces uno puede postular que ha habido miles de millones, quizás 50.000 millones de especies desde el origen de la vida. Sólo una de éstas adquirió el tipo de inteligencia necesaria para establecer una civilización.

Es difícil proporcionar un número exacto porque el rango de variación, tanto en el origen de las especies como en su expectativa de vida, es enorme. Las especies populosas, usualmente halladas por los paleontólogos, ampliamente difundidas y de larga duración geológica (millones de años), son probablemente excepcionales, más que típicas.

¿Por qué la inteligencia superior es tan poco común?

Las adaptaciones que son favorecidas por la selección, como los ojos o la bioluminiscencia, se originan en la evolución independientemente innumerables veces. La inteligencia superior se ha originado sólo una vez, en los seres humanos. Sólo se me ocurren dos posibles razones que explicarían esta singularidad. Una es que la inteligencia superior no es favorecida en absoluto por la selección natural, contrariamente a lo que esperaríamos. De hecho, todos los otros tipos de organismos vivos, millones de especies, viven bien sin inteligencia superior.

La otra razón posible para la singularidad de la inteligencia es que es extraordinariamente difícil adquirirla. Es posible detectar cierto grado de inteligencia sólo en algunos animales de sangre caliente (aves y mamíferos), lo cual no es sorprendente ya que el cerebro requiere energías extremadamente altas. Pero aún así existe un gran paso desde “cierto grado de inteligencia” a “inteligencia superior”.

El linaje homínido se separó del chimpancé hace cerca de 5 millones de años, pero el gran cerebro del hombre moderno fue adquirido hace menos de 300.000 años. Como sugirió un científico (Stanley 1992), se requirió una emancipación total de la vida arbórea para hacer que los brazos de las madres estuviesen disponibles para cargar los bebés indefensos durante las etapas finales de la formación cerebral. Tan solo un 6 por ciento de las formas de vida dentro de la línea homínida, desarrollaron un cerebro grande que facilitó el surgimiento de la inteligencia superior. Parece que se requiere una compleja combinación de circunstancias improbables y favorables para producir la inteligencia superior (Mayr 1994).

¿Cuánta inteligencia se necesita para producir una civilización?

Como se mencionó anteriormente, es posible detectar rudimentos de inteligencia en aves (cuervos, loros) y en mamíferos no homínidos (carnívoros, delfines, monos, simios y más), pero ninguno de estos niveles de inteligencia alcanza para fundar una civilización.

¿Toda civilización es capaz de mandar señales al espacio y de recibirlas?

La respuesta es claramente no. En los últimos 10.000 años han habido al menos 20 civilizaciones en la Tierra, desde la del Valle del Indo, Sumeria, y otras civilizaciones del Oriente cercano, hasta Egipto, Grecia, y toda la serie de civilizaciones europeas, así como los Mayas, los Aztecas, los Incas y las tantas civilizaciones chinas e indias. Sólo una de éstas alcanzó un nivel tecnológico que le ha posibilitado enviar señales artificiales al espacio y recibirlas.

¿Estarán los órganos sensitivos de los seres extraterrestres adaptados para recibir nuestras señales electrónicas?

Esto no es para nada seguro. Aún en la Tierra muchos grupos de animales están especializados para estímulos olfativos o químicos, y no reaccionarían a señales electrónicas. Ni las plantas ni los hongos son capaces de recibir señales electrónicas. Aunque hubiera organismos avanzados en algún planeta,

sería bastante improbable que hayan desarrollado los mismos órganos sensitivos que nosotros.

¿Por cuánto tiempo puede una civilización recibir señales?

Todas las civilizaciones tienen una duración limitada. Trataré de enfatizar la importancia de este punto contando una pequeña fábula.

Asumamos que existen seres realmente inteligentes en otro planeta en nuestra galaxia. Hace mil millones de años sus astrónomos descubrieron la Tierra y llegaron a la conclusión de que este planeta podría tener las condiciones propicias para producir inteligencia. Para verificar esto, mandaron señales a la Tierra durante mil millones de años sin tener una sola respuesta. Finalmente, en el año 1800 (de nuestro calendario) decidieron mandar señales durante 100 años más. Para el año 1900, no habían obtenido ninguna respuesta, por lo que concluyeron que seguramente no había vida inteligente en la Tierra.

Esto muestra que aún si hubiera miles de civilizaciones en el universo, la probabilidad de establecer una comunicación exitosa sería muy estrecha debido a la corta duración de la "ventana abierta" de comunicación.

Uno no debe olvidar que el rango de los sistemas de observación radioastronómica y óptica de SETI es muy limitado, teniendo la capacidad de detectar señales de una intensidad que sólo podrían originarse en parte de nuestra galaxia. El hecho de que haya un número casi infinito de galaxias adicionales en el universo, es irrelevante en lo que concierne a los proyectos SETI.

Conclusiones: Una improbabilidad de dimensiones astronómicas

¿Qué conclusiones debemos sacar de estas consideraciones? No menos de seis de las ocho condiciones necesarias para el éxito de los programas de observación SETI son muy poco probables. Cuando multiplicamos estas seis probabilidades tan bajas obtenemos una improbabilidad de dimensiones astronómicas.

No obstante: ¿por qué hay tantos defensores del proyecto SETI? Cuando uno observa sus profesiones, encuentra que se trata casi exclusivamente de astrónomos, físicos e ingenieros. Simplemente no son conscientes del hecho de que el éxito de cualquier proyecto SETI no es una cuestión de leyes físicas y capacidades tecnológicas, sino que es esencialmente un tema de factores

biológicos y sociológicos. Estos, obviamente, no han sido tenidos en cuenta en los cálculos del éxito posible de cualquier proyecto SETI.

Referencias

Mayr, E. Lohnt sich die Suche nach extraterrestrischer Intelligenz (¿Vale la pena realizar una búsqueda de inteligencia extraterrestre?) *Naturwissenchaftliche Rundschau*, vol. 45 (7): 264-266, 1992.

Mayr, E. Does it Pay to Acquire High Intelligence? *Perspectives in Biology and Medicine*, vol.37: 150-154, 1994.

Stanley, S. An Ecological Theory of the Origin of Homo, *Paleobiology*, vol.18: 237-257, 1992.

3. La Abundancia de planetas que albergan vida

Por Carl Sagan

Vivimos en una época de notable exploración y descubrimiento. La mitad de las estrellas cercanas, similares al Sol, disponen de discos circumestelares de gas y polvo, equivalentes al que tuvo la nebulosa solar de la cual se formó nuestro planeta hace 4.600 millones de años. Por medio de una técnica inesperada –residuos de los retardos temporales de las señales de radio– hemos descubierto dos planetas similares a la Tierra alrededor del pulsar B1257+12. Recientemente, también fueron detectados astrométricamente, planetas de la masa de Júpiter alrededor de las estrella 51 *Pegasi,* 70 *Virginis* y 47 *Ursae Majoris.*

Una nueva gama de técnicas utilizadas desde la Tierra o el espacio –incluyendo la astrometría, la espectrofotometría, la medición de las velocidades radiales, el uso de óptica adaptativa e interferometría- parecen estar a punto de detectar nuevos planetas jovianos, si es que existen, alrededor de las estrellas más cercanas.

Al menos una propuesta (El Proyecto FRESIP: Frecuencia de Planetas Interiores del Tamaño de la Tierra, un sistema espectrofotométrico montado en el espacio) promete detectar planetas terrestres con mayor facilidad que los jovianos. De no existir una interrupción en el financiamiento, probablemente estaremos entrando en una era dorada en el estudio de los planetas de otras estrellas de la Vía Láctea[3].

No obstante, un planeta de masa terrestre, no tiene porqué ser un planeta terrestre. Consideremos el ejemplo alternativo de Venus. Pero existen medios por los cuales, incluso desde la posición estratégica de la Tierra, podemos investigar este tema. Podemos buscar el patrón espectral del agua que se requiere para sostener océanos. Podemos buscar oxígeno y ozono en la atmósfera planetaria.

Podemos buscar moléculas como el metano, en un desequilibrio termodinámico con el oxígeno, tal que sólo pueda ser producido por la vida. De hecho, todas estas pruebas fueron realizadas exitosamente por la misión *Galileo*

3 NOTA DEL EDITOR: Esta frase de Carl Sagan, escrita originalmente en 1995, se ha tornado en una realidad tangible mediante la implementación de proyectos de la envergadura del telescopio espacial KEPLER.

en sus encuentros cercanos con la Tierra en 1990 y 1992 al retomar su camino hacia Júpiter (Sagan *et al.*, 1993).

Las mejores estimaciones sobre el número y espaciado de planetas de masa terrestre en los sistemas planetarios en etapas tempranas de formación, como informó George Wetherill, en la primer conferencia internacional sobre zonas de habitabilidad circumestelares (Doyle, 1995), combinados con las mejores estimaciones actuales acerca de la estabilidad de océanos a largo plazo en una variedad de planetas (como informó James Kasting en la misma conferencia), sugieren que existen entre uno y dos planetas terrestres alrededor de cada estrella de tipo solar. Las estrellas mucho más masivas que el Sol, son comparativamente más escasas y envejecen rápido. Se espera que las estrellas comparativamente menos masivas que el Sol tengan planetas terrestres, pero los planetas que son suficientemente cálidos para la vida posiblemente estén anclados por fuerzas de marea, haciendo que una cara esté siempre apuntando hacia su estrella central. Sin embargo, en estos mundos, los vientos podrían llegar a redistribuir el calor de un hemisferio al otro, y su habitabilidad potencial recién está siendo motivo de estudio y análisis.

No obstante, la mayoría de la evidencia actual sugiere la existencia de un gran número de planetas distribuidos a través de la Vía Láctea con abundante agua líquida estable durante miles de millones de años. Algunos serán apropiados para la vida –nuestro tipo de vida, de carbono y agua líquida– durante miles de millones de años menos que la Tierra, algunos durante miles de millones de años más. Y, por supuesto, la Vía Láctea es una entre un sinnúmero, quizás cien mil millones, de galaxias.

¿La inteligencia necesariamente evolucionaría en un mundo habitado?

A partir de las estadísticas de los cráteres lunares, calibrados por muestras traídas a través de las misiones Apolo, sabemos que la Tierra sufrió, hace aproximadamente 4.000 millones de años, un bombardeo infernal de grandes y pequeños mundos provenientes desde el espacio. Este golpeteo fue lo suficientemente severo como para arrastrar atmósferas y océanos enteros hacia el espacio exterior. Antiguamente, la totalidad de la corteza Terrestre estaba constituida por un océano de magma. Claramente, este no fue un terreno fértil para la vida.

Sin embargo, poco después –Mayr adopta el número de 3.800 millones de años atrás– surgieron los primeros organismos (de acuerdo con la evidencia fósil). Presumiblemente, el origen de la vida debe haber ocurrido poco antes de esto. Tan pronto las condiciones se hicieron favorables, la vida comenzó en nuestro planeta a una velocidad sorprendente. He usado este hecho (Sagan 1974) para argumentar que el origen de la vida debe ser una circunstancia altamente probable. Ni bien las condiciones ambientales lo permiten, ¡entonces la vida aparece!

Ahora bien, reconozco que esto es a lo sumo un argumento de plausibilidad y poco más que una extrapolación a partir de un único ejemplo. Pero lo mejor que podemos hacer es restringimos a los datos.

¿Es posible aplicar un análisis similar a la evolución de la inteligencia?

La Tierra es un planeta rebosante de vida, cuyo ambiente está en constante cambio, desde hace 2.000 millones de años dispone de una atmósfera rica en oxígeno, atravesó la elegante diversificación que Mayr resumió anteriormente – y en donde durante casi 4.000 millones de años no emergió nada que se parezca ni remotamente a una civilización tecnológica.

En los comienzos de estos debates (por ejemplo, Simpson 1964), los autores argumentaban que se requería un gran número de pasos individualmente improbables para producir algo muy similar a un ser humano, un "humanoide"; que las probabilidades de que tal hecho ocurriera en otro planeta eran nulas; y que por lo tanto la probabilidad de la existencia de vida inteligente era cercana a cero. Pero claramente cuando hablamos de inteligencia extraterrestre, no estamos hablando (a pesar de *Star Trek*) de humanos o humanoides. Estamos hablando del equivalente funcional de los humanos –es decir, cualquier criatura capaz de construir y operar radiotelescopios. Podrían vivir en la tierra o en el mar o el aire. Podrían tener químicas, formas, tamaños, colores, extremidades y opiniones inimaginables. No estamos pensando que sigan la ruta particular que condujo a la evolución de los humanos. Debe haber muchos caminos evolutivos, cada uno improbable, pero la suma del número de caminos hacia la inteligencia puede ser, sin embargo, substancial.

En la presentación de Mayr, hay incluso un eco del artículo de Simpson (1964) *"La no prevalencia de humanoides"*. Pero el argumento básico es, creo, aceptable para todos nosotros. La evolución es oportunista y no pre-

visiva. No "planea" desarrollar la inteligencia en unos miles de millones de años en el futuro. Responde a contingencias de corto plazo. Aun así, tal como sucede en otros campos, es mejor ser inteligente que ser estúpido, y se puede percibir una tendencia general hacia la inteligencia en los registros fósiles. En algunos mundos, la presión de la selección hacia la inteligencia puede ser más alta; en otros, más baja.

Si consideramos las estadísticas de nuestro propio caso –y tomamos un tiempo típico desde el origen de un sistema planetario al desarrollo de una civilización tecnológica de 4.600 millones de años– ¿qué sigue? No esperaríamos que las civilizaciones en mundos distintos evolucionaran en un paso fijo. Algunas alcanzarían la inteligencia tecnológica más rápido, otras más lento, y "sin lugar a dudas" algunas nunca. Pero la Vía Láctea está atiborrada de estrellas de segunda y tercera generación (es decir, aquellas que poseen elementos pesados) tan antiguas como 10.000 millones de años.

Imaginemos dos curvas: La primera es la escala temporal probable hacia la evolución de la inteligencia tecnológica. Comienza en valores muy bajos; y en unos pocos miles de millones de años podría tener un valor significativo; en 5.000 millones de años, alcanza el 50 por ciento. La segunda curva representa las edades de las estrellas tipo solar, algunas de las cuales son muy jóvenes –están naciendo ahora mismo– mientras que otras tienen 10.000 millones de años de edad.

Si convolucionamos estas dos curvas, encontramos que hay una probabilidad de civilizaciones tecnológicas en planetas de estrellas de edades muy diferentes –no mucha en las demasiado jóvenes, pero más y más en las de mayor edad. El caso más probable es que el proyecto SETI detecte primero una civilización considerablemente más avanzada que la nuestra. Para cada una de esas civilizaciones, habrá habido decenas de miles de millones, o más, de especies adicionales. El número de sucesos improbables que haya tenido que ser concatenado para que esas especies pudieran evolucionar es enorme, y quizás existan miembros de cada una de esas especies que se enorgullecen de ser los únicos seres inteligentes de todo el universo.

¿Las civilizaciones necesariamente desarrollarían la tecnología para SETI?

Es perfectamente posible imaginar civilizaciones de poetas o (quizás) guerreros de la Edad de Bronce que nunca se tropezaron con las ecuaciones de James C. Maxwell y los receptores de radio. Pero serían sustituidas por la selección natural. La Tierra se encuentra rodeada de una población de asteroides y cometas que hacen que ocasionalmente el planeta se vea golpeado por uno lo suficientemente grande como para provocar daños substanciales. El episodio más famoso es el evento K-T (el impacto de un objeto cercano a la Tierra que ocurrió al final del período Cretácico y comienzos del Terciario), 65 millones de años atrás, el cual extinguió a los dinosaurios y muchas otras especies en la Tierra. Pero la probabilidad de que ocurra un impacto capaz de destruir una civilización es de uno en 2.000 en el próximo siglo.

Ya está claro que necesitamos elaborar medios de detección y seguimiento de objetos cercanos a la Tierra, así como los medios para su intercepción y destrucción. Si fallamos en esta tarea, simplemente seremos destruidos.

Las civilizaciones del Valle del Indo, Sumeria, Egipcia y Griega, así como otras, no tuvieron que enfrentar esta crisis porque no vivieron lo suficiente. Cualquier civilización duradera, terrestre o extraterrestre, debe haberse enfrentado con este peligro. Otros sistemas solares tendrán flujos de cometas y asteroides más o menos intensos, pero en casi todos los casos los peligros han de ser substanciales para la supervivencia de la especie.

La radiotelemetría, el monitoreo por radar de asteroides, y el concepto del espectro electromagnético es parte fundamental de cualquier tecnología temprana necesaria para lidiar con semejante amenaza. Por ende, cualquier civilización duradera se verá forzada, por selección natural, a desarrollar una tecnología apropiada similar a la utilizada en las observaciones de SETI. Por supuesto que no existe ninguna necesidad de tener órganos sensitivos que “vean” en la región de radio. Simplemente alcanza con la física.

Como la perturbación y la colisión en los cinturones de asteroides y cometas es perpetua, la amenaza de asteroides y cometas es igualmente perpetua, y no existe ningún momento en el que la tecnología pueda ser retirada.

A la vez, un programa de observación SETI representa una pequeña fracción del costo que significa lidiar con la amenaza de los cometas y asteroides. Por lo tanto, no es para nada cierto que SETI sea “muy limitado, alcanzando sólo una parte de nuestra galaxia.” De existir transmisores lo suficientemente

potentes, podríamos usar utilizar las actuales observaciones de los programas SETI para analizar la información de galaxias distantes. Como las transmisiones extraterrestres más probables de detectar serían las correspondientes a las civilizaciones más antiguas, podríamos esperar que estas sean también lo suficientemente potentes como para ser detectadas por nuestros actuales receptores y analizadores espectrales. Esta ha sido una de las estrategias aplicadas en los proyectos META (Mega Channel Extra Terrestrial Assay) de la Universidad de Harvard y del IAR en Argentina.

¿Es el programa SETI una fantasía de los físicos?

Mayr ha sugerido repetidamente que los proponentes de SETI son casi exclusivamente físicos y astrónomos, mientras que los biólogos tienen una visión más profunda y acertada. Como las tecnologías implicadas están relacionadas con las ciencias físicas, es razonable que los astrónomos, físicos e ingenieros desempeñen un papel principal en los programas de investigación SETI. Pero en 1982, cuando realicé una petición internacional publicada en la prestigiosa revista *Science* urgiendo la respetabilidad de SETI, no tuve dificultad alguna en lograr que la firmaran distinguidos biólogos y bioquímicos, incluidos David Baltimore, Melvin Calvin, Francis Crick, Manfred Eigen, Thomas Eisner, Stephen Jay Gould, Matthew Meselson, Linus Pauling, David Raup, y Edward O. Wilson. En mis tempranas especulaciones sobre estos asuntos, fui muy entusiasmado por mi mentor en biología, H.J. Muller, Premio Nobel de Genética. La petición publicada proponía que, en lugar de especular sobre el tema, refutáramos la hipótesis mediante las observaciones:

"*Es unánime nuestra convicción de que la única prueba significativa de la existencia de inteligencia extraterrestre es experimental. Ningún argumento a priori sobre la materia puede ser concluyente ni puede ser usado como sustituto de un programa observacional.*"

Referencias

Doyle, L.R. ed. *Circumstellar Habitable Zones: Proceedings of the First International Conference,* Menlo Park: Travis House Publications, 1996.

Sagan, C. The origins of life in a cosmic context, *Origins of Life*, Vol. 5: 497-505, 1974.

Sagan, C. *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*, New York: Random House, 1994.

Sagan, C. y A. Druyann. *Shadows of Forgotten Ancestors: A Search for Who We Are*, New York: Random House, 1992.

Sagan, C.; W.R. Thompson; R. Carlson; D. Gurnett y C. Hord. A Search for Life on Earth from the Galileo Spacecraft, *Nature*, vol. 365: 715-721, 1993.

Shklovskii, I.S. y C. Sagan. *Intelligent Life in the Universe*, San Francisco: Holden-Day, 1966.

Simpson, G.G. The Non-Prevalence of Humanoids, *Science*, vol. 143: 769-775, 1964.

4. Discusión

Ernst Mayr:

Entiendo completamente que la naturaleza de nuestro objeto de estudio nos permite solamente estimar probabilidades. No hay discrepancia alguna entre Carl Sagan y yo en cuanto a la existencia de grandes números de planetas en nuestra galaxia y en galaxias cercanas. El asunto, como fue enfatizado correctamente por Sagan, es la probabilidad de la evolución de una inteligencia superior y consecuentemente de una civilización tecnológica en un mundo habitado.

Una vez que tenemos vida (y casi seguramente será muy distinta de la vida en la Tierra), ¿cuál es la probabilidad de que desarrolle un linaje con inteligencia superior? En la Tierra, de los millones de linajes de organismos y quizás 50.000 millones de eventos de especialización, sólo uno condujo a la inteligencia superior; esto me hace creer en su absoluta improbabilidad.

Sagan adopta el principio "más listo es mejor" pero la vida en la Tierra refuta esta afirmación. Entre todas las formas de vida, ni los procariotas ni los protistas, hongos o plantas han necesitado desarrollar la inteligencia, como lo habrían hecho si fuese "mejor". En los más de 28 filos de animales, la inteligencia evolucionó sólo en uno (cordados) y con ciertas dudas también en los cefalópodos. Y en las miles de subdivisiones de los cordados, la inteligencia superior se desarrolló en un sólo caso, los primates, e incluso allí en una pequeña subdivisión. Esto no demuestra la supuesta inevitabilidad del desarrollo de la inteligencia superior porque "es mejor ser listo".

Sagan aplica un enfoque físico a este problema. Construye dos curvas lineales, ambas basadas en un pensamiento estrictamente determinista. Tal pensamiento es a menudo legítimo para los fenómenos físicos, pero es bastante inapropiado para eventos evolutivos o procesos sociales como el origen de las civilizaciones.

El argumento de que los extraterrestres, si perteneciesen a una civilización longeva, se verían forzados por la selección natural a desarrollar un saber tecnológico para enfrentar el peligro de los impactos cometarios es totalmente irrealista. ¿Cómo serían seleccionados los sobrevivientes de impactos previos para desarrollar el saber de la tecnología electrónica necesaria? Asimismo, el caso de la Tierra muestra cuán improbable es el origen de cualquier civiliza-

ción a menos que la inteligencia superior se desarrolle primero. La Tierra asimismo muestra que las civilizaciones tienen inevitablemente corta duración.

Es una cuestión de sentido común que la existencia de inteligencia extraterrestre no puede ser establecida por argumentos *a priori*. Pero esto no justifica el proyecto SETI, ya que puede ser demostrado que el éxito de un programa observacional es tan improbable que puede, para fines prácticos, ser considerado cero.

En suma, no tengo la impresión de que los argumentos de Sagan hayan refutado los míos al grado de debilitarlos.

Carl Sagan

¿Es oportuno basarse en la vida en la Tierra? La esencia del argumento del Profesor Mayr es básicamente recorrer los varios factores de la ecuación de Drake (ver Shklovskii y Sagan, 1966) y asignarle valores cualitativos a cada uno. Él y yo estamos de acuerdo en que es esperable que las probabilidades de abundancia de planetas y orígenes de la vida sean altos. Enfatizo que los últimos resultados (Doyle 1995) sugieren uno o incluso dos planetas tipo Tierra con abundante agua líquida superficial, por cada sistema planetario en la galaxia.

Donde Mayr y yo discrepamos es en los últimos factores de la ecuación de Drake, especialmente en aquellos que atañen la probabilidad de la evolución de la inteligencia y las civilizaciones tecnológicas.

Mayr argumenta que los procariotas y protistas no han "evolucionado hacia la inteligencia". A pesar del gran respeto que le tengo al Profesor Mayr, debo objetar: los procariotas y los protistas son nuestros ancestros. Por lo tanto, han evolucionado hacia la inteligencia, junto con la mayoría del resto de la hermosa diversidad de la vida en la Tierra.

Por un lado, cuando destaca la pequeña fracción de especies que tienen inteligencia tecnológica, Mayr argumenta a favor de la relevancia de la vida en la Tierra en el problema de la inteligencia extraterrestre. Pero por otro lado, desprecia el ejemplo de la vida en la Tierra cuando ignora el hecho de que la inteligencia ha surgido aquí cuando nuestro planeta tiene otros cinco mil millones de años más de evolución por delante. Si fuera legítimo extrapolar desde el único ejemplo que tenemos frente a nosotros de la vida planetaria, se deduciría lo siguiente:

1. Hay enormes cantidades de planetas tipo Tierra, cada uno colmado de enormes cantidades de especies, y
2. En mucho menos del tiempo de evolución estelar en cada sistema planetario, al menos una de esas especies va a desarrollar inteligencia superior y tecnología.

Alternativamente, podríamos argumentar que es inapropiado extrapolar a partir de un sólo ejemplo. Pero entonces el argumento de uno en 50.000 millones de Mayr colapsa. Se me ocurre que él no puede plantearlo de la manera que le conviene según el caso. Con respecto a la evolución de la tecnología, cabe destacar que los chimpancés y los bonobos tienen cultura y tecnología. No sólo usan herramientas sino que también las elaboran a propósito para su uso futuro (ver Sagan and Druyan, 1992). De hecho, el bonobo Kanzi ha descubierto cómo manufacturar herramientas de piedra.

Es cierto, como destaca Mayr, que de las principales civilizaciones humanas, sólo una ha desarrollado la tecnología de la radiocomunicación. Pero esto dice muy poco acerca de la probabilidad que tiene una civilización humana de desarrollar tal tecnología. La misma civilización con radiotelescopios ha estado también a la vanguardia de la tecnología armamentista. Si, por ejemplo, la civilización de Europa occidental no hubiese destruido completamente a la civilización Azteca, ¿estos últimos habrían desarrollado radiotelescopios en el transcurso de siglos o milenios? Ya tenían un calendario astronómico superior al de los conquistadores.

Civilizaciones y especies apenas más capaces podrían tener la habilidad de eliminar la competencia. Pero esto no significa que la competencia no hubiese podido desarrollar capacidades comparables de no haber sido perturbados.

Mayr asegura que las plantas no reciben señales "electrónicas". Asumo que a lo que se refiere son señales "electromagnéticas". Pero las plantas lo hacen. Su existencia fundamental depende de recibir radiación electromagnética del Sol. La fotosíntesis y el fototropismo se pueden encontrar no sólo en las plantas más simples sino también en los protistas.

Todas las estrellas emiten luz visible, y las estrellas tipo solar emiten la mayoría de la radiación electromagnética en la parte visible del espectro. La percepción de la luz es una manera mucho más efectiva de comprender el ambiente a cierta distancia; ciertamente mucho más potente que los rastros olfativos. Es difícil imaginar una civilización tecnológica competente que no preste la debida atención a sus principales medios de examinar el mundo ex-

terior. Incluso si usaran principalmente luz visible, ultravioleta, o infrarroja, la física es exactamente la misma que la de las ondas de radio; la diferencia es simplemente una cuestión de longitud de onda.

No insisto en que los argumentos anteriores sean convincentes, pero tampoco lo son los opuestos. No hemos podido investigar aún la evolución de biosferas en una gran gama de planetas. No hemos observado muchos casos de lo que es posible y lo que no. Hasta que no tengamos tal experiencia –o detectemos inteligencia extraterrestre- estaremos ciertamente envueltos en la incertidumbre.

La idea de que podamos, por medio de argumentos *a priori*, excluir la posibilidad de vida inteligente en los posibles planetas de las 400 mil millones de estrellas en la Vía Láctea me suena rara. Me recuerda a la gran cantidad de presunciones humanas que nos ubicaban en el centro del universo, o que nos diferenciaban no sólo en grado sino también en esencia del resto de la vida en la Tierra, o incluso afirmaban que el universo fue hecho en nuestro beneficio (Sagan, 1994). Comenzando con Copérnico, se ha mostrado que cada una de estas presunciones resulta carente de fundamentos.

En el caso de la inteligencia extraterrestre, admitamos nuestra ignorancia, pongamos a un lado los argumentos *a priori* y usemos la tecnología que tenemos la suerte de haber desarrollado para tratar de encontrar la respuesta. Esto es, pienso, lo que Charles Darwin –quien se convirtió de la religión ortodoxa a la biología evolutiva por el peso de evidencias observacionales– hubiera defendido.

Ernst Mayr

Como todo con lo que lidiamos son probabilidades, la mayoría de ellas extrapoladas de una muestra de uno, permítanme hacer unas pocas observaciones con respecto a la respuesta de Carl Sagan:

(1) No tenemos evidencia alguna del enorme número de planetas tipo Tierra "cada uno colmado de enormes cantidades de especies."

(2) Hay un mundo de diferencias entre plantas fotosintéticas y una civilización que desarrolla las teorías necesarias y la instrumentación para la comunicación electrónica.

(3) Sagan afirma “No hemos podido investigar aún la evolución de biosferas en una gran gama de planetas”, la verdad es que no la hemos investigado en ningún planeta fuera de la Tierra.

(4) No estoy hablando de la posibilidad de vida inteligente; estoy hablando de la probabilidad de establecer un contacto con los medios disponibles. Ninguno de los argumentos de Sagan ha debilitado mi argumento de que ésta es prácticamente nula. Ésta no es una presunción, sino un cálculo serio de probabilidades. La respuesta negativa que seguramente tendremos no nos dirá nada acerca de la posibilidad de la inteligencia extraterrestre en algún lugar.

Carl Sagan

Saqué la conclusión tentativa de que otros planetas tipo terrestres tienen millones de especies de vida en ellos, del mismo conjunto de datos que conduce al Profesor Mayr a concluir que no hay civilizaciones técnicas extraterrestres. Mayr ahora concede (su observación 4) que puede haber inteligencia extraterrestre. ¿Quizás grandes números de planetas habitados por vida inteligente? Pero él duda acerca de si esta inteligencia puede haber desarrollado los medios necesarios para comunicaciones interestelares a través de ondas electromagnéticas. Como he enfatizado, no existe forma convincente alguna de evaluar este interrogante excepto, buscando transmisiones de radio interestelares. Eso es lo que estamos haciendo.

Capítulo 2

Una breve historia social de la astrobiología en Iberoamérica

Guillermo A. Lemarchand

Resumen. El trabajo se divide en tres secciones: en la primera se describe la evolución histórica de los principales argumentos presentados acerca de la pluralidad de mundos habitados, de los presocráticos al nacimiento de la ciencia moderna. En la segunda se analiza la puja por delimitar la actividad científica de búsqueda de vida fuera de la Tierra bajo una denominación específica. Finalmente, en la tercera parte, se presenta una breve descripción de la historia social de la ciencia, que permitió el incipiente desarrollo de la astrobiología en Iberoamérica.

Abstract. The work is divided into three sections: the first one describes the historical evolution of the main arguments presented about the plurality of inhabited worlds, from the presocratics to the birth of modern science. The second section analyzes the race to define the search for life beyond Earth as a scientific activity under a specific name. Finally, the third part presents a brief description of the social history of science that allowed the early development of astrobiology in Iberoamerica.

Guillermo A. Lemarchand (✉)

Consultor Regional del Programa de Ciencias Básicas e Ingeniería (2008-2010) de la Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe y Director del Proyecto SETI en el Instituto Argentino de Radioastronomía, C.C. 8 –Sucursal 25, C1425ZAB, Buenos Aires, Argentina

lemar@correo.uba.ar

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 23 -52,

1. Introducción al concepto de pluralidad de mundos habitados: del paradigma aristotélico al nacimiento de la ciencia moderna

Las raíces del pensamiento acerca de la pluralidad de mundos habitados, se remonta a la antigua Grecia. Uno de sus más destacados defensores fue Epicuro (341-270 a.C.), quien desarrolló ciertas ideas basadas en Leucipo (siglo V a. C) y Demócrito (460 - 370 a. C.) donde postulaba que: (1) la materia está compuesta por átomos, (2) el presente estado de la naturaleza es resultado de un largo proceso evolutivo y (3) la vida existe en todas partes en el Universo. En una carta que Epicuro le escribiera a Herodoto (Bailey 1957) se puede encontrar el siguiente fragmento que demuestra la convicción pluralista de esta escuela de pensamiento:

"…hay infinitos mundos como el nuestro y distintos al él. Los átomos que son infinitos en número… nacen en las profundidades del espacio. Debemos asumir que un número finito de átomos forman los mundos como el nuestro, también aquellos mundos distintos al nuestro y aquellos que no pertenecen a ninguna de estas categorías. Por lo tanto, no existe ningún obstáculo para la existencia de un número infinito de otros mundos…. Debemos creer que en todos los mundos hay criaturas vivientes, plantas y otras cosas que encontramos en nuestro propio mundo".

Siglos más tarde, el historiador Plutarco (46-120 d.C.) desarrolló el primer esbozo de lo que actualmente se define como *Principio de Mediocridad* (Hoerner 1961). Planteó la tesis de la pluralidad de mundos habitados basado en las siguientes cuatro premisas: (1) la Tierra no ocupa ninguna posición privilegiada en el universo; (2) la Tierra y los cuerpos pesados no constituyen el centro del universo según postula el paradigma aristotélico y están distribuidos homogéneamente por una mente superior; (3) la Luna es lo suficientemente parecida a la Tierra como para sustentar vida y (4) si no existiera vida en la Luna no tendría sentido su propia existencia.

Se debe destacar que todas estas especulaciones filosóficas tuvieron lugar en un ambiente en donde el paradigma aristotélico era hegemónico y donde la sola idea de existencia de otros mundos similares a la Tierra contradecía sus propios cimientos. Para Aristóteles (384-322 a.C.) y sus seguidores el *elemento tierra* ocupaba el centro del universo y era seguido secuencialmente por los

elementos *agua*, *aire, fuego* y *éter*. En este paradigma, cada elemento tenía la naturaleza de moverse siempre en dirección de su esfera de pertenencia. Por esta razón, simplemente no era posible encontrar el elemento tierra en los cielos, ya que de existir debería manifestar movimientos violentos en dirección al centro del universo (la Tierra) y este hecho no era observado. Por lo tanto, para los aristotélicos era imposible concebir la sola existencia de otros mundos habitados.

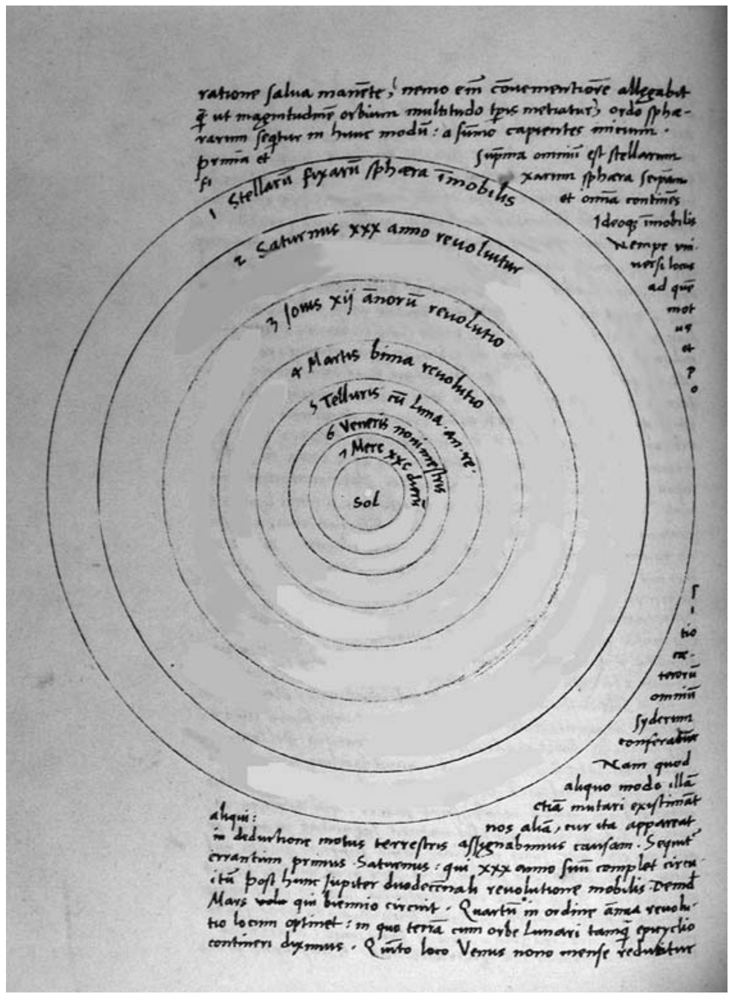


Fig. 1 - Manuscrito de Nicolás Copérnico en donde plantea el primer modelo heliocéntrico del sistema solar. Foto: Guillermo A. Lemarchand tomada en la Colección de Libros Raros de la Universidad de Colorado en Boulder.

Con el advenimiento del nuevo paradigma copernicano, nuevas ideas acerca de la pluralidad de mundos habitados comenzaron a surgir. Sin duda uno de sus más audaces defensores fue Giordano Bruno (1548-1600), cuya pasión por los nuevos y osados conocimientos era escasamente más limitada que la infinitud del universo que reclamaba. En 1584 publica *Del infinito universo y sus mundos*, texto del cual se extrajo el siguiente diálogo:

"Burquio: ¿Así pues que los otros mundos están habitados como este?

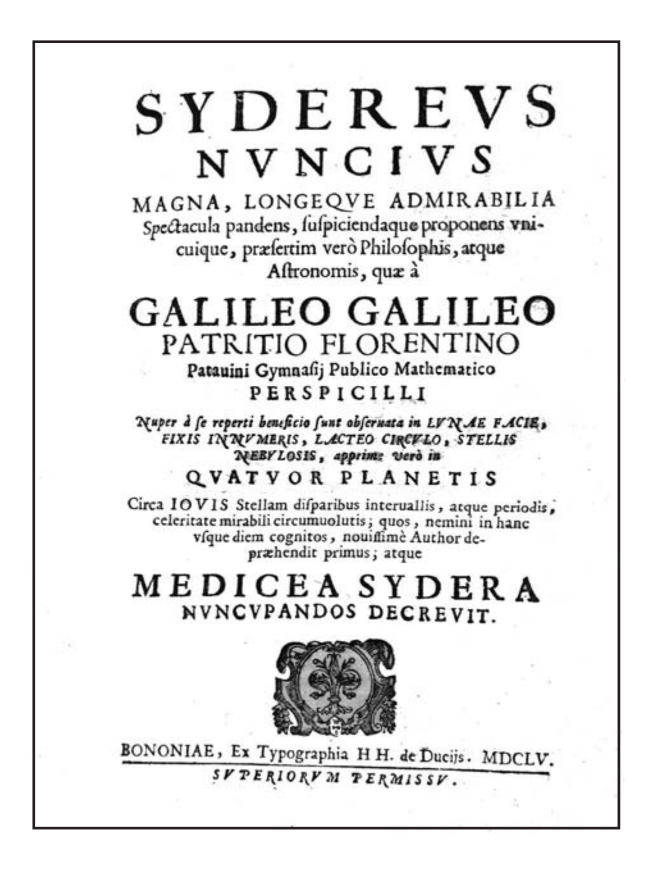
Fracastorio: Si no es así y de mejor modo, por lo menos igualmente, porque es imposible que un espíritu racional y un tanto despierto pueda imaginar que carezcan de parecidos y mejores habitantes innumerables mundos que se revelan tan magníficos, o más que este, los cuales o son soles o no reciben menos que el Sol, los divinísimos y fecundos rayos que tanto nos revelan la felicidad de su propio sujeto y fuente como hacen dichosos a los circunstantes que participan de tal fuerza difundida. Son pues, infinitos los innumerables y principales miembros del universo, que tienen igual rostro, aspecto, prerrogativas, fuerzas y efecto."

El 17 de febrero de 1600, en Roma, la Inquisición trasladó a Bruno a su lugar de ejecución. Su crimen: herejía. Entre sus creencias figuraban que la Tierra no era el centro del universo, había un infinito número de mundos y la vida existía en ellos… La sentencia: debería ser quemado en la hoguera.

Ante tan horroroso espectáculo, Galileo Galilei (1584-1642), se manifestó más prudente y en su *"Carta sobre las manchas solares"* escribió lo siguiente:

"Es posible creer en la probabilidad de que existan seres vivientes y vegetales en la Luna y los planetas, cuyas características no solo los hagan distintos a los terrestres, sino sumamente diferentes de aquellos que puede imaginar nuestra salvaje imaginación. Por mi parte, no puedo afirmar o negar dicha posibilidad. Dejo esta decisión a hombres más eruditos que yo."

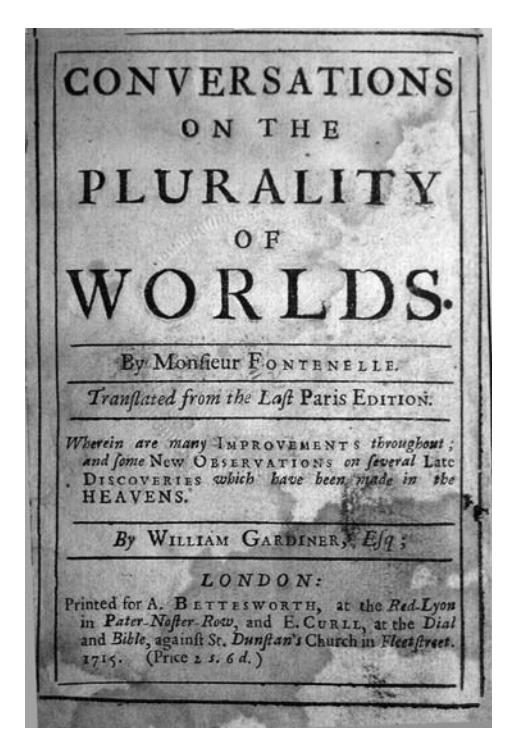
En 1610, Johanes Kepler (1571-1630) redacta un pequeño texto en respuesta a los sorprendentes descubrimientos que Galileo había realizado con su telescopio, dentro de sus páginas se encuentra el siguiente párrafo:



SYDEREVS
NVNCIVS
MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
Spectacula pandens, ſuſpiciendaque proponens vnicuique, præſertim verò Philoſophis, atque Aſtronomis, quæ à
GALILEO GALILEO
PATRITIO FLORENTINO
Patauini Gymnaſij Publico Mathematico
PERSPICILLI
Nuper à ſe reperti beneficio ſunt obſeruata in LVNAE FACIE, FIXIS INNVMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS NEBVLOSIS, apprimè verò in
QVATVOR PLANETIS
Circa IOVIS Stellam diſparibus interuallis, atque periodis, celeritate mirabili circumuolutis; quos, nemini in hanc vſque diem cognitos, nouiſſimè Author deprehendit primus; atque
MEDICEA SYDERA
NVNCVPANDOS DECREVIT.
BONONIAE, Ex Typographia H H. de Ducijs. MDCLV.
SVPERIORVM PERMISSV.

Fig. 2 - Carátula del libro *"El Mensajero Sideral"* escrito por Galileo Galilei (1610) en donde comunica sus descubrimientos con el telescopio. Foto: Guillermo A. Lemarchand tomada en la Colección de Libros Raros de la Universidad de Colorado en Boulder.

"...Así pues, está claro que nuestra Luna es para los que estamos en la Tierra y no para los demás globos, mientras que esas cuatro lunitas que se hallan en Júpiter no son para nosotros, sino que los cuerpos que orbitan sirven respectivamente a cada uno de sus globos planetarios y a sus habitantes. De estas consideraciones concluimos que es muy grande la probabilidad de que existan habitantes en Júpiter, algo que también pensaba Tycho Brahe, basándose exclusivamente en la enormidad de ese globo."



CONVERSATIONS
ON THE
PLURALITY
OF
WORLDS.

By Monſieur FONTENELLE.

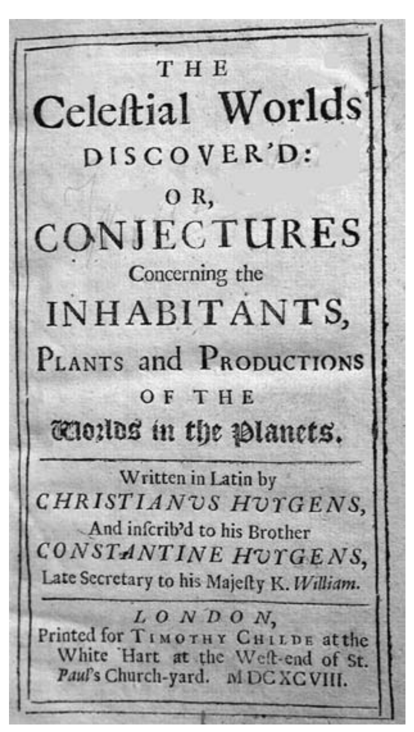
Tranſlated from the Laſt Paris EDITION.

Wherein are many IMPROVEMENTS *throughout; and ſome* New OBSERVATIONS *on ſeveral* Late DISCOVERIES *which have been made in the* HEAVENS.

By WILLIAM GARDINER, *Eſq;*

LONDON:

Printed for A. BETTESWORTH, at the *Red-Lyon* in *Pater-Noſter-Row*, and E. CURLL, at the *Dial* and *Bible*, againſt St. *Dunſtan's* Church in *Fleetſtreet*. 1715. (Price 2 *s.* 6 *d.*)



THE
Celeſtial Worlds
DISCOVER'D:
OR,
CONJECTURES
Concerning the
INHABITANTS,
PLANTS and PRODUCTIONS
OF THE
Worlds in the Planets.

Written in Latin by
CHRISTIANVS HVYGENS,
And inſcrib'd to his Brother
CONSTANTINE HVYGENS,
Late Secretary to his Majeſty K. *William.*

LONDON,

Printed for TIMOTHY CHILDE at the White Hart at the Weſt-end of St. *Paul's* Church-yard. MDCXCVIII.

Fig. 3 - Portada de dos libros que ejercieron una poderosa influencia en la discusión sobre la pluralidad de mundos habitados: *Conversaciones sobre la Pluralidad de Mundos* por B. de Fontenelle (1686) y *Mundos Celestiales: Descubrimientos y conjeturas concernientes a los habitantes, plantas y producciones de los mundos en los planetas* por C. Huygens (1698). Foto: Guillermo A. Lemarchand tomada en la Colección de Libros Raros de la Universidad de Colorado en Boulder.

En los siglos sucesivos las discusiones comenzaron a incorporar argumentos cada vez más sofisticados (Lemarchand, 1992:11-36). Con el advenimiento de la *Teoría de Evolución* basada en el *principio de Selección Natural* y desarrollada independientemente por Charles Darwin (1809-1882) y Alfred R. Wallace (1823-1913), la discusión acerca de la pluralidad de mundos habitados en el universo adquiere una nueva dimensión. Si bien Darwin nunca mencionó en sus escritos la posibilidad de vida fuera de la Tierra, Wallace (1903, 1907) mantuvo una posición muy escéptica en cuanto a la posibilidad de vida extraterrestre, en particular la vida inteligente, intentando imponer una visión de universo más antropocentrista. En sus escritos utilizó el mismo tipo de línea argumental basada en la improbabilidad estadística de repetición de la serie de eventos que permitieron, a través de la selección natural, el surgimiento de la inteligencia y la civilización. Décadas después otros dos destacados biólogos

evolucionistas, Ernst Mayr (1904-2005) y George G. Simpson (1902-1984) usaron argumentos similares para despreciar las posibilidades de vida inteligente en otros mundos.

Se necesitó esperar hasta mediados del siglo XX, para llevar estas pioneras discusiones filosóficas al terreno de la ciencia moderna y comenzar, por primera vez, a plantear experimentos y observaciones destinadas a encontrar las primeras evidencias de que la vida es un fenómeno de características universales.

2. Una nueva ciencia en busca de identidad

La búsqueda de vida en el universo –como rama de la ciencia- ha venido extendiendo su campo de aplicación y desarrollo durante las últimas décadas. En consecuencia, han surgido a través de los años una multiplicidad de términos para describir sus múltiples facetas de estudio. Palabras tales como *astrobiología, cosmobiología, exobiología, xenobiología* y *bioastronomía* han venido usándose indistintamente, para describir las actividades vinculadas a los estudios del origen de la vida en la Tierra y su búsqueda en el resto del universo. El alcance y aplicación de sus distintos significados se suele superponer y confundir. ¿Cuál es, entonces, el término más adecuado para describir esta actividad? La respuesta dependerá de quién responda. Muchos de estas denominaciones tienen casi un siglo de antigüedad (Lemarchand 1998). En lo que sigue se presentará una versión actualizada de un trabajo previo (Lemarchand 2000).

El término *"astrobiología"* fue acuñado por vez primera en la literatura académica, en una serie de artículos especializados escritos por René Berthelot (1932-1937) y luego compilados en un volumen publicado originalmente en francés (Berthelot 1938).

En estos trabajos Berthelot considera que la astrobiología responde a una etapa intermedia en el desarrollo del pensamiento humano sobre el mundo, entre las sociedades de recolectores-cazadores y la ciencia moderna, por lo que ocuparía el lugar asignado a la metafísica en el esquema de Comte. En esta concepción, la astrobiología es una combinación de la creencia en las regularidades astronómicas y en una interpretación animista o vitalista, de todos los fenómenos. En definitiva considera a la astrobiología como lo que comúnmente llamaríamos astrología. Para Berthelot el avance de la astrobiología se produjo en relación con el desarrollo de la agricultura, que ha llevado

al reconocimiento de la periodicidad de las estaciones y la creación de un calendario sistemático basado en el movimiento ordenado de las estrellas.

Posiblemente, si a mediados de la década del noventa, los responsables de la NASA hubieran encontrado estas citas originales de Berthelot, jamás hubieran asociado al término astrobiología con el programa de búsqueda de vida en el universo, que desarrolló la agencia espacial de EEUU desde entonces.

La historia de la ciencia muestra la intención de definir y circunscribir constantemente las áreas emergentes de investigación. Cuando la existencia de vegetación en Marte parecía posible, el astrónomo soviético, Gavriil Adrianovich Tikhov (1875-1960) sugirió el establecimiento de la *astrobotánica*, un campo que combina la astronomía y la botánica destinado a tratar de comprender las propiedades ópticas de los ecosistemas terrestres y de la hipotética vegetación marciana.

En 1947, inauguró la "Sección de Astrobotánica de la Academia de Ciencias de la República de Kazajstán" de la ex Unión Soviética. En 1953, comienza a utilizar en sus publicaciones también el término *astrobiología* como una generalización del estudio de la biología terrestre al de los sistemas vivientes en otros mundos.

En una conferencia de la Sociedad Interplanetaria Británica realizada en 1952, el físico y filósofo de la ciencia irlandés, John D. Bernal (1901-1971) amplió sus especulaciones sobre el origen de la vida en el universo, afirmando que "la biología del futuro no estaría limitada a la Tierra", y ésta abarcaría un espectro muchísimo más amplio transformándose, en una verdadera *cosmobiología.* Este ha sido tal vez uno de los primeros términos utilizados, por un científico de fama internacional, para describir un campo que estudiaría las posibilidades de actividades biológicas y de la vida más allá de nuestro planeta.

En 1955, el astrónomo Otto Struve (1897-1963) acuñó en forma independiente la palabra *astrobiología*, con el objeto de describir el estudio amplio de la vida fuera de la Tierra. Struve también se desempeñó como el primer director del Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO) de los EEUU. En noviembre de 1961 tuvo la responsabilidad de organizar, la *Conferencia de Green Bank*, destinada a determinar la posibilidad de detectar evidencias de vida inteligente en el universo y donde se presentó por primera vez la llamada *Ecuación de Drake*, destinada a determinar el posible número de civilizaciones tecnológicas en la galaxia.

Por entonces el término astrobiología comenzaba a popularizarse. Flavio A. Pereira (1956) de la Sociedad Brasilera Interplanetaria (organización her-

mana de la tradicional Sociedad Interplanetaria Británica) publicó en Brasil, un libro en portugués sobre astrobiología, posiblemente el primero dedicado a la acepción moderna de esta temática. Al año siguiente, en junio de 1957, Albert G. Wilson, director del Observatorio Lowell, organizó el primer "Simposio Americano de Astrobiología".

A finales de la década del cincuenta, existían en EEUU dos grandes grupos de destacados científicos que tenían la responsabilidad de coordinar las investigaciones dentro del campo de la "vida extraterrestre". El primero de ellos era el *Panel 2 sobre Vida Extraterrestre del Comité Nacional de Bioastronáutica perteneciente a la Junta de las Fuerzas Armadas,* estaba presidido por Melvin Calvin (1911-1997) y contaba con la participación de Carl Sagan (1934-1996). El segundo grupo conformaba el *Panel sobre Vida Extraterrestre de la Academia Nacional de Ciencias* que fue presidido por el destacado biólogo y genetista Joshua Lederberg (1925-2008). Durante esos días, las temáticas eran dominadas por la búsqueda de vida en Marte y el desarrollo de los dispositivos de abordo, destinados a las primeras sondas planetarias. Esta actividad científica era –en aquella época– denominada genéricamente como *Bioastronáutica*.

Lederberg (1960) publicó un artículo seminal en el que acuñó el término *exobiología* para describir lo que llamó "la biología de origen extraterrestre". Años más tarde, también introduce el término *esobiología*, en referencia a la biología de la propia Tierra. Según Lederberg: "El objetivo primordial de la investigación exobiológica es comparar los diversos modelos de evolución química de los planetas, haciendo hincapié en aquellas características dominantes que están presentes en cada uno de ellos."

En febrero de 1963, se organizó el primer simposio internacional sobre exobiología en el ámbito del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA En el prólogo de las actas de la reunión, sus editores Mamikunian y Briggs (1965) escribieron: "La biología fuera del entorno terrestre ha sido definida como exobiología por el profesor Joshua Lederberg de la Universidad de Stanford, mientras que otros prefieren el término cosmobiología para referirse al estudio de las biologías presentes en el sistema solar, la galaxia, e incluso los sistemas extragalácticos."

En 1964, George G. Simpson, caracterizó, en forma muy filosa, el uso y abuso de la expresión *exobiología,* que le resultaba por lo menos muy curiosa, si se tiene en cuenta el hecho que esta "ciencia" todavía tenía que demostrar que su objeto de estudio existía realmente. Simpson no compartía la euforia de algunos de sus colegas exobiólogos a quienes consideraba que la actividad

que desempeñaban los estaba transformando rápidamente en “ex-biólogos” (Simpson 1964).

En 1965, Gilvert Levin analizó distintos términos empleados en el pasado para definir la búsqueda de biologías de origen extraterrestre. Finalmente llega a la conclusión que el término más adecuado para definir la actividad debía ser *xenobiología* (Levin 1965).

A finales de la década de los cincuenta, con el incremento exponencial de la sensibilidad de los equipos radioastronómicos, se propone su uso para detectar señales electromagnéticas de hipotéticas civilizaciones extraterrestres (Cocconi y Morrison, 1959). En 1960, Frank D. Drake llevó a cabo el primer experimento, utilizando las instalaciones del NRAO. Desde entonces, el objetivo de estos proyectos ha sido la detección de señales artificiales provenientes de estrellas cercanas, utilizando los telescopios de radio disponibles en todo el mundo. El descubrimiento de una señal que no pudiera ser asociada a una fuente de origen natural, estaría indicando la existencia de vida inteligente más allá de la Tierra. Durante los años sesenta, se originaron varios trabajos científicos, libros, y reuniones académicas, destinadas a desarrollar las metodologías más apropiadas de detección, que fueron por entonces categorizadas bajo el lema de “Comunicación Interestelar” (Hoerner 1961; Cameron, 1963; Kaplan 1971, Cameron y Ponnamperuma 1974).

En 1965, con el fin de organizar una reunión internacional sobre el problema de las civilizaciones extraterrestres, el profesor Rudolf Pesek acuñó el acrónimo *CETI* para definir los programas de Comunicación con Inteligencias Extra Terrestres. La elección estaba relacionada también con el hecho bien conocido que *Ceti* en inglés es el genitivo de Cetus (la familia a la cual pertenecen los delfines). Los primeros intentos de comunicación entre especies se habían hecho en la década del cincuenta con los delfines. Por otra parte, una de las estrellas que había sido observada por Frank Drake en su proyecto OZMA fue precisamente *Tau Ceti.* Por estas razones, los participantes de la Conferencia de Green Bank, se comenzaron a considerar a sí mismos como “Miembros de la Orden del Delfín”.

El 15 de mayo de 1965, durante la séptima sesión de la Academia Internacional de Astronáutica (IAA), Pesek propuso “CETI” como el tema de un simposio de tres días de IAA. Después de varias reuniones y la conformación de un comité internacional de organización el programa recomendado fue el siguiente: (1) Perspectivas astronómicas de la vida; (2) Origen de la vida en la Tierra y búsqueda de vida en el Sistema Solar; (3) Evolución de la inteligencia; (4) Evolución de sociedades tecnológicas; (5) Sitios potenciales para



Fig. 4 - Como ejemplo del interés público acerca de la búsqueda de vida inteligente en el universo, la UNESCO publica un detallado artículo sobre la comunicación interestelar en un número de El Correo en enero de 1966.

la búsqueda de inteligencia extraterrestre; (6) Adquisición y procesamiento de las señales; (7) CETI y su impacto en la Humanidad y (8) Perspectivas y recomendaciones para futuras investigaciones. Una observación cuidadosa muestra que casi cincuenta años después, las reuniones internacionales, conservan la misma agenda.

Finalmente, el Comité Organizador CETI de la IAA canceló la conferencia prevista y decidió organizar una sesión de medio día "CETI: reunión de revisión durante el Congreso de la Federación Astronáutica Internacional en Viena (1972). Durante las diversas reuniones de las distintas organizaciones internacionales que tuvieron lugar entre 1965 y 1971, la temática "Comunicación Interestelar" fue reemplazada por el acrónimo "CETI".

El simposio anterior fue sustituido por una conferencia soviético-norteamericana sobre CETI celebrada en Byurakan entre el 5-11 de septiembre de 1971. La misma se organizó en conmemoración al décimo aniversario de la Conferencia de Green Bank. La reunión se celebró a la vista del monte Ararat, en el Observatorio Astrofísico Byurakan (en la ex República Soviética

de Armenia). Fue, patrocinado por las Academias de Ciencias de los Estados Unidos y de la Unión Soviética. Así como en Green Bank, el principio organizador de la conferencia fue la *Ecuación de Drake* (Sagan, 1973). En una forma u otra, por estos días se consideraba a la Ecuación de Drake como la base epistemológica de la investigación CETI.

Después de una serie de talleres organizados por la NASA, a mediados de los años setenta, algunos expertos temieron que un hipotético mensaje extraterrestre de una sociedad avanzada podría hacer perder la fe en la capacidad de la raza humana y eventualmente privar de la iniciativa para hacer nuevos descubrimientos, o generar consecuencias negativas para la humanidad (Morrison et al 1977). Pese a que si se recibiera un mensaje no existiría ninguna obligación de responder, los organizadores de estos talleres decidieron cambiar la sigla de comunicación con inteligencias extraterrestres (CETI) a la de Búsqueda de Inteligencias Extra Terrestres (SETI). Desde entonces, este término se viene utilizando ampliamente.

En los años ochenta, con el fin de obtener algún apoyo institucional de las autoridades de la NASA y del Congreso de EEUU, el proyecto SETI fue rebautizado con el nombre SETI MOP (Proyecto de observación en microondas). Una década después, por razones similares, la sigla se volvió a reemplazar por HRMS (Relevamiento de Microondas en Alta Resolución). Con este cambio se eliminó definitivamente la palabra SETI. El proyecto HRMS de la NASA involucraba un programa de observación de diez años y una inversión que superaba ampliamente los cien millones de dólares. Comenzó a funcionar el 12 de octubre de 1992, conmemorando el quinto centenario del descubrimiento de América. Finalmente, en 1993, el Congreso de EEUU canceló toda participación de la NASA en cualquier programa SETI.

La sigla SETI puede introducir cierta confusión al lego ya que –por el momento– no se dispone de ninguna tecnología que permita detectar “inteligencias” en forma directa a través de distancias interestelares. Lo único que se puede hacer, es intentar detectar manifestaciones de actividades tecnológicas. Si en el medio del océano se encontrara flotando una botella con un mensaje en su interior es posible que no se pudiera entender el significado del mensaje, pero con toda certeza se podría inferir que un ser inteligente fabricó la botella y colocó un mensaje en ella.

Popper consideraba que la principal actividad científica consiste en falsar teorías. Por lo tanto, con el fin de poner a prueba la hipótesis original de que existe vida inteligente en el universo, la estrategia que se está desarrollando es diseñar una búsqueda exhaustiva de Actividades Tecnológicas de origen

Extraterrestre. Lemarchand (1992, 1994) propuso utilizar la sigla en inglés SETTA *(Search for Extra Terrestrial Technological Activities)* para definir en forma más precisa el tipo de investigación que se lleva a cabo.

La participación activa de la Unión Astronómica Internacional (UAI) en la búsqueda de vida extraterrestre fue iniciada con el patrocinio de la reunión conjunta de varias comisiones durante la XVII Asamblea General de Montreal en 1979. Allí se organizó un simposio denominado: "Estrategias para la Búsqueda de Vida en el Universo" (Papagiannis 1980). Esta reunión terminó con una sesión abierta celebrada en el gran auditorio de la Universidad de Montreal. Allí asistieron más de 1000 astrónomos y parte del auditorio siguió las presentaciones de pie.

Tras el éxito de la reunión de Montreal, en 1982, durante XVIII Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional (IAU) realizada en Patras (Grecia), se creó la Comisión 51. La misma recibió la denominación de *Bioastronomía* (búsqueda astronómica de la vida –bios– en el universo) y se estableció para consolidar el esfuerzo internacional en la búsqueda de vida extraterrestre. Desde entonces, la Comisión 51 ha organizado 9 conferencias internacionales sobre *Bioastronomía* (ver detalles en Lemarchand 2000).

Junto con la IAU, la Sociedad Internacional para los Estudios sobre el Origen de la Vida (ISSOL) ha desempeñado un papel fundamental en la promoción y articulación de los trabajos vinculados al origen de la vida en la Tierra y su posible existencia en otros mundos. Cada tres años organiza conferencias internacionales con una creciente participación de representantes de Iberoamérica.

Después del anuncio del descubrimiento del meteorito ALH80001, en 1996, donde se especulaba acerca de la posibilidad de bacterias de origen marciano, la NASA puso en marcha un ambicioso Programa de Astrobiología. Este inyectó decenas de millones de dólares al sistema de investigación y desarrollo, logrando que en pocos años, la comunidad de científicos que se dedicaban a la exobilogía, bioastronomía, etc. se multiplicaran varios órdenes de magnitud.

En su acepción moderna la *astrobiología* es definida como el estudio de los orígenes, evolución, distribución y futuro de la vida en el universo. Para su desarrollo se requieren conceptos fundamentales acerca de la vida y entornos habitables que ayudan a reconocer biosferas que pudieran ser muy diferentes de las nuestras. La astrobiología abarca la búsqueda de planetas potencialmente habitados más allá de nuestro Sistema Solar, la exploración de Marte y los planetas exteriores, y las investigaciones de laboratorio sobre los orígenes

y la evolución temprana de la vida, así como estudios sobre el potencial de la vida para adaptarse a los retos del futuro, tanto en la Tierra como en el espacio. Es una investigación netamente interdisciplinaria y para su desarrollo es necesario combinar los saberes de la biología molecular, la ecología, la ciencia planetaria, astronomía, ciencias de la información, tecnologías de exploración espacial, y otras disciplinas afines. La astrobiología promueve una comprensión más amplia e integradora de los fenómenos biológicos, planetarios y cósmicos.

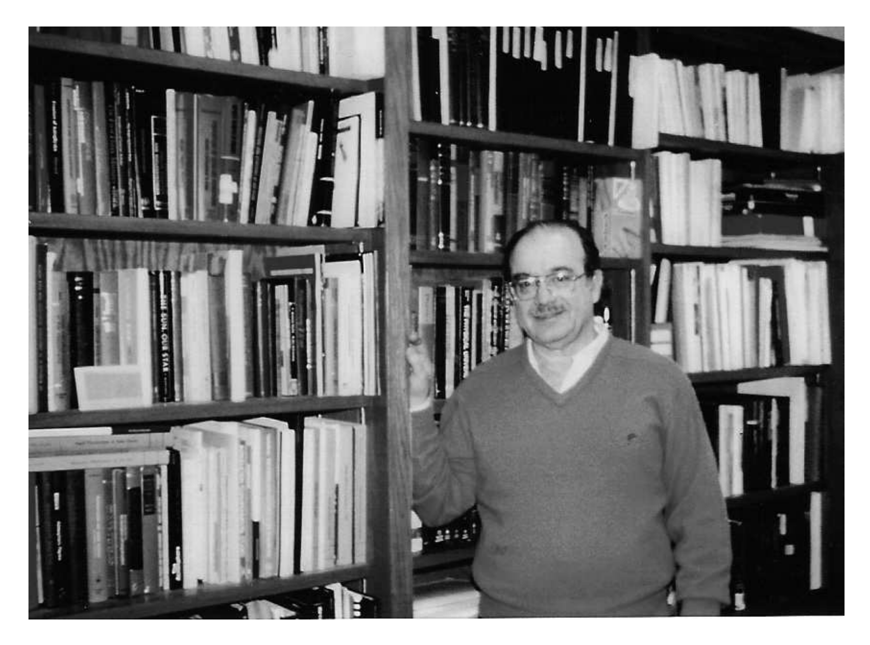


Fig. 5 - Prof. Michael D. Papagiannis (1932-1998), director del Departamento de Astronomía de la Universidad de Boston y fundador de la Comisión 51 de Bioastronomía de la Unión Astronómica Internacional. Foto: Guillermo A. Lemarchand (c. 1988).

3. Algunos hitos en el desarrollo de la astrobiología en Iberoamérica

Durante el 2010 se está celebrando, en diversos países de América Latina, el bicentenario de su independencia. Es curioso que algunos de los patriotas que participaron en dicho proceso fueran también los primeros en especular –en estas latitudes– acerca de la vida en otros mundos. Uno de ellos fue Manuel

Moreno (1782-1857), político y médico argentino, hermano menor de Mariano Moreno, prócer de la Revolución de Mayo.

Manuel Moreno apoyó la Revolución de Mayo y ejerció cargos menores dependientes de la Primera Junta. En 1811 acompañó en su misión diplomática a Gran Bretaña a Mariano, pero éste murió en alta mar por una intoxicación con un medicamento que le administró mal el capitán del barco. Al llegar a Londres permaneció sin una misión clara, aprovechando el tiempo en estudiar y escribir su *Vida y Memorias de Mariano Moreno*. Regresó a Buenos Aires en 1812 y fue nombrado secretario del Segundo Triunvirato, que estaba dominado por la Logia Lautaro, a la que se incorporó. Durante las sesiones de la Asamblea del Año XIII, defendió firmemente desde la prensa la forma republicana de gobierno.





GAZETA DE BUENOS-AYRES.

JUEVES 7 DE JUNIO DE 1810.

ORDEN DE LA JUNTA.

Fig. 6 - Manuel Moreno (1782-1857), político y médico argentino, hermano del prócer de la Revolución de Mayo (1810), Mariano Moreno (1778-1811). Fundó el Departamento de Medicina de la Universidad de Buenos Aires y en sus textos en la Gazeta de Buenos Ayres especuló acerca del origen de la vida en la Tierra y en otros mundos.

Años más tarde fundó el Departamento de Medicina de la Universidad de Buenos Aires. Desde 1823, dictó la cátedra de química de la universidad, siendo el primero en dar clases públicas de esa disciplina en el país, hecho que le valió el mote de "Don Óxido". En sus escritos en *La Gazeta* discutió acerca del origen de la vida en la Tierra y de la posible existencia de vida en otros mundos.

Otro destacado patriota rioplatense que especuló acerca de la vida en otros mundos fue Vicente Fidel López (1815-1903). En cartas particulares comentando la obra *Cosmos* de Alexander von Humboldt (c. 1847-1850) discute el origen del vulcanismo y acerca de la posibilidad que éste último esté presente en otros mundos como fuente de generación de vida.

Es bien conocido que parte del trabajo de campo de Charles Darwin que le permitió –como naturalista– concebir y desarrollar la teoría del origen de las especies fue realizado en América del Sur. En su recorrido con el Beagle, tuvo la oportunidad de recorrer las pampas argentinas, la cordillera de los Andes, el desierto de Atacama y las islas Galápagos.

En agosto de 1924, Marte tuvo un acercamiento orbital a la Tierra. David Tood, profesor de astronomía del Armhest College de EEUU, propuso –por entonces– detectar señales radiofónicas emitidas por hipotéticos habitantes marcianos. Dichas señales podrían estar siendo dirigidas hacia la Tierra aprovechando la coincidencia de que en ese momento la distancia entre ambos planetas sería mínima. Todd inició una campaña internacional para que los grandes transmisores de radio, instalados en todo el mundo, cesaran de transmitir durante 5 minutos, en cada hora, para apuntar todos los receptores hacia Marte sin la interferencia de las señales de origen terrestre. El 21 de agosto de 1924, el periódico *The New York Times,* informó que el Prof. Todd había tenido una conversación con el Embajador Pueyrredon, representante argentino en Washington, y que la Argentina se había comprometido a que sus más poderosos transmisores hicieran silencio de radio de acuerdo al esquema presentado. Aparentemente, Brasil se habría sumado también a dicha iniciativa. Este es el antecedente histórico más antiguo de un verdadero proyecto SETI de carácter internacional y de la participación de América Latina en el mismo.

El gran precursor de la ciencia biológica en México, Alfonso L. Herrera (1868-1944) fue reconocido por sus grandes méritos en múltiples instituciones científicas mundiales, ganador de las Palmas Académicas de Francia, y el único mexicano miembro de la *Academia del Lincei* de Roma al lado de otros científicos como Einstein, Newton y Ohm. Herrera desempeñó un papel fundamental en introducir nuevas teorías acerca del origen de la vida. Desarrolló la teoría de la plasmogenia para explicar el origen de la vida; en ella destaca los procesos de formación del protoplasma, compuesto fundamental para que se manifestaran las primeras formas de vida (Herrera 1924, 1932). En sus investigaciones también demostró la síntesis abiótica de compuestos orgánicos; sin embargo no llegó a definir completamente los límites entre la

materia viva y la materia inanimada. Fue el primer biólogo de la región en publicar un artículo sobre el origen de la vida en la prestigiosa revista *Science* (Herrera 1942).

Sin embargo, el científico iberoamericano que se consagró como experto mundial en temas de origen de la vida y "exobiología" fue Joan Oró (1923-2004). En 1956, fundó el Departamento de Ciencias Biofísicas en la Universidad de Houston, donde estudió el metabolismo del ácido fórmico en los tejidos animales, investigaciones que serían clave para el estudio sobre el origen de la vida y la interpretación de la ausencia de vida en el planeta Marte. Se lo considera como uno de los fundadores de la cosmoquímica orgánica. Alcanzó fama mundial cuando en la Navidad de 1959, encerrado en su laboratorio, descubrió la síntesis de la adenina, una de las moléculas más importantes para la vida. La paradoja de su descubrimiento fue que esta sustancia pudo ser sintetizada a partir del ácido cianhídrico, uno de los productos más venenosos (Oró y Kimball 1961). Dos años más tarde publicó su artículo seminal acerca del papel que tuvieron los cometas en el origen de la vida en la Tierra (Oró 1961). En 1963, participó del Primer Simposio Internacional de Exobiología organizado en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA (Mamikunian y Briggs 1965). Desde entonces desarrolló varios programas de investigación espacial de la NASA, como en el proyecto Apolo para el análisis de las rocas y otras muestras de material de la Luna, y en el proyecto Viking, encargándose del desarrollo de un instrumento para el análisis molecular de la atmósfera y la materia de la superficie del planeta Marte. En 1999, junto a Julián Chela Flores y el autor dirigieron la *Primera Escuela Iberoamericana de Astrobiología* (Chela Flores et al 2000).

En 1966 se funda el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), su primer director fue Carlos María Varsavsky (1933-1983) un astrofísico de la Universidad de Harvard. En 1968 publica el primer libro de un científico latinoamericano sobre búsqueda de vida inteligente en el universo (Varsavsky, 1968). Escrito en un estilo ameno, el libro, ejerció una poderosa influencia en varias generaciones de jóvenes científicos. Dentro del grupo fundador del IAR se encontraban también dos jóvenes radioastrónomos que desempeñarían un papel fundamental en el posterior desarrollo de la búsqueda de vida extraterrestre en la región: Fernando Raúl Colomb (1939-2008) y Valentín Boriakoff (1938-1999).

A principios de la década del setenta, el Prof. Raúl Ondarza, de la Universidad Nacional Autónoma de México, organizó un simposio sobre origen de la vida en donde participaron, entre otros, figuras de la talla de Stanley Miller,

Joan Oró, Carl Sagan, Cyril Ponnamperuma. Allí, Alicia Negrón Mendoza, conoció a Ponnamperuma y se fue a trabajar con él, obteniendo el primer doctorado de América Latina en un tema vinculado al origen de la vida.

En 1975, Antonio Lazcano Araujo, Alfredo Barrera y Juan Luis Cifuentes, llevaron a Aleksandr I. Oparin (1894-1980) a México y organizaron un simposio internacional en su honor (Lazcano y Barreda 1978).

Para 1977, Antonio Lazcano ya tenía su curso universitario de "Origen de la vida", había publicado un texto que fue traducido a varios idiomas (Lazcano, 1977) y se encontraba trabajando con Stanley Miller y Joan Oró. Sin duda, a partir de entonces "Toño" se transformó en un pilar fundamental en el cual se apoyaron los estudios sobre origen de la vida en México. El trabajo de "Toño" promovió la formación de decenas de doctorandos y expertos internacionales de origen mexicano en esta temática. Merced al reconocimiento internacional logrado, se desempeñó, en dos oportunidades, como Presidente de la Sociedad Internacional sobre Estudios del Origen de la Vida (ISSOL).

En 1977 el ingeniero argentino, Valentín Boriakoff, uno de los fundadores del IAR, resuelve la manera de registrar imágenes en formato de 33 ½ r.p.m. para el disco interestelar de las naves Voyager I y II. Colaborando de esta manera en el diseño de un mensaje interestelar destinado a una hipotética civilización extraterrestre. Una foto del propio Boriakoff fue incluida dentro del contenido de los discos de las naves *Voyager*, imagen que se perpetuará en los confines del medio interestelar, por al menos, unos doscientos mil años…

En la primavera de 1979, un grupo de profesores de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, organizaron un curso sobre el enfoque científico de la búsqueda de vida inteligente en el universo que se desarrolló en Santiago de Chile (Campusano 1985). Posiblemente este fue el primer curso formal de carácter universitario sobre vida en el universo dictado en la región.

En junio de 1984, la recién formada Comisión 51 de Bioastronomía de la Unión Astronómica Internacional (IAU) organizó en la ciudad de Boston el primer simposio oficial de la IAU dedicado a los estudios de búsqueda de vida en el universo. El astrónomo nacido en Uruguay y nacionalizado argentino, Félix Mirabel participó en dicha reunión y promovió la posibilidad de comenzar a realizar investigaciones radioastronómicas de búsqueda de señales de origen extraterrestre desde el hemisferio sur (Mirabel, 1984). Años más tarde, "Raúl" Colomb sería designado como presidente de la Comisión 51 de la IAU.



Fig. 7 - Grupo de jóvenes estudiantes de física junto a R. Bruce Crow, especialista en SETI de la NASA, durante la organización de las Jornadas Interdisciplinarias sobre la Vida Inteligente en el Universo, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, diciembre de 1985. Foto: G. A. Lemarchand. (c.1985).

En diciembre de 1985 un grupo de entusiastas estudiantes de física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN) de la Universidad de Buenos Aires, organizaron las *Primeras Jornadas Interdisciplinarias sobre Vida Inteligente en el Universo* (Lemarchand, 1986). El evento se desarrolló durante tres días consecutivos y contó con la participación de más de una veintena de especialistas, entre los que se destacaban Robert Bruce Crow (especialista en temas de SETI de la NASA), Félix Mirabel (radioastrónomo del Observatorio de Arecibo en Puerto Rico), Miguel Ángel Virasoro (físico de la Universidad de Roma y más tarde director del ICTP, Centro de Física Teórica de Trieste), Fernando R. Colomb (Director del IAR), Gregorio Klimovsky (epistemólogo y decano de la FCEN), Aldo Armando Cocca (jurista de renombre internacional, especialista en derecho del espacio). Durante la reunión participaron cerca de 500 estudiantes y público general que colmaron el aula magna de la FCEN.

Las "jornadas" facilitaron la firma de un convenio de cooperación entre el Instituto Argentino de Radioastronomía y *The Planetary Society* para la consolidación de un programa observacional de SETI desde el hemisferio sur.

El 7 de octubre de 1986 comenzaron las primeras observaciones SETI desde el IAR (Colomb y Lemarchand 1989). El grupo de investigación liderado por "Raúl" Colomb estaba integrado por María Cristina Martín y el autor. Un año después se había transformado en el proyecto más importante

realizado, hasta entonces, en el hemisferio sur (Lemarchand 1992; Colomb et al 1992).

Mientras las antenas del IAR se encontraban rastreando señales artificiales de origen extraterrestre alrededor de las estrellas cercanas del hemisferio sur, en 1987 se organizó en Buenos Aires un seminario para discutir los aspectos radiastronómicos, sociales y jurídicos de la detección de señales electromagnéticas de origen extraterrestre (Cocca 1988). La reunión estuvo coordinada por el destacado jurista internacional Aldo Armando Cocca, uno de los autores del Tratado del Espacio (1967) y de la Luna y otros Objetos Celestes (1979). Su objetivo fue discutir los alcances de un protocolo internacional que se estaba elaborando dentro del ámbito del Instituto Internacional de Derecho Espacial (IISL), la Academia Internacional de Astronáutica (IAA), la Unión Astronómica Internacional (IAU) y la Federación Internacional de Astronáutica (IFA),



Fig. 8 - De izquierda a derecha: Y. Terzian, Director del Departamento de Astronomía de la Universidad de Cornell; Carl Sagan, Director del Laboratorio de Estudios Planetarios de la Universidad de Cornell y Presidente de The Planetary Society y Guillermo A. Lemarchand (c. 1988).

En enero de 1988 el autor visitó el programa SETI que estaba funcionando desde la Universidad de Harvard y estableció las bases para la elaboración de un convenio que redactó unas semanas después en la sede de *The Planetary Society* (TPS) en Pasadena, California. En octubre de 1988, durante una conferencia internacional sobre búsqueda de inteligencias extraterrestres organizada por TPS en el Centro de Ciencias de Ontario (Canadá), su presidente, Carl Sagan y el director del IAR, Fernando R. Colomb, anunciaron la

firma de un convenio de cooperación entre el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET) de Argentina y *The Planetary Society*, para la construcción de una réplica de un analizador espectral de 8,4 millones de canales, con una resolución espectral de 0,05 Hertz por canal, que se encontraba en operación en el radiotelescopio de 26 m de la Universidad de Harvard.

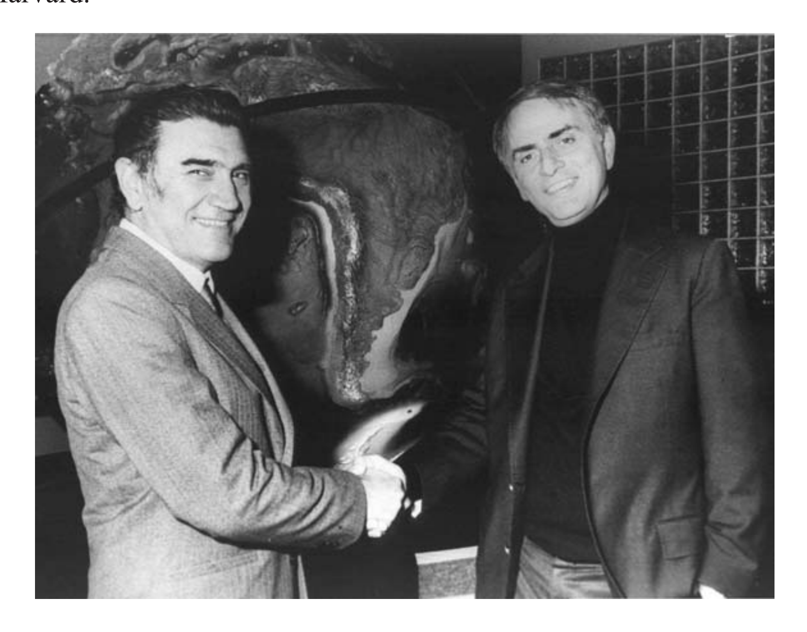


Fig. 9 - Fernando R. Colomb y Carl Sagan durante la firma del Convenio entre The Planetary Society y el Instituto Argentino de Radioastronomía en el Museo de Ciencias de Ontario en Canadá en octubre de 1988. Foto: Guillermo A. Lemarchand.

Dos ingenieros argentinos, Eduardo Hurrell y Juan Carlos Olalde, permanecieron por un año en la Universidad de Harvard, bajo la dirección del Prof. Paul Horowitz, construyendo el analizador espectral denominado META II (Megachannel Extra Terrestrial Assay).

Finalmente, a las 10 de la mañana de un soleado 12 de octubre de 1990, el proyecto META II era inaugurado en la Argentina por Louis Friedman (director ejecutivo de TPS) y Fernando R. Colomb, quienes apuntaron la antena II del IAR hacia la constelación de la Cruz del Sur. A partir de entonces, por primera vez en la historia de la humanidad, se disponía de un programa de búsqueda de señales de origen extraterrestre que observaba constantemente todo el cielo accesible desde la Tierra. El hemisferio norte era relevado desde el radiotelescopio de la Universidad de Harvard en Oak Ridge y el hemisferio

sur desde el IAR. El sistema argentino observó sistemáticamente todo el cielo del hemisferio sur, entre declinaciones de -10º y -90º, en diversas frecuencias durante más de una década (Lemarchand et al. 1997).



Fig. 10 - Los ingenieros argentinos Juan Carlos Olalde y E. Eduardo Hurrell en las instalaciones del laboratorio Lyman en la Universidad de Harvard, poniendo a punto el analizador espectral de 8,4 millones de canales destinado al IAR bajo la dirección del Prof. Paul Horowitz.

Mientras tanto, muy cerca de allí, en la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República, en Montevideo, Uruguay, Julio A. Fernández un especialista internacional en cometas, junto con un nutrido conjunto de expertos internacionales en diversas disciplinas, organizó en marzo de 1988, un ciclo de conferencias *"Vida y Cosmos: Un enfoque interdisciplinario"* (Fernández 1988) y luego en febrero de 1995 una escuela de posgrado *"Vida y Cosmos: Nuevas reflexiones"* (Fernández y Mizraji 1995). Ambos eventos generaron una gran efervescencia entre estudiantes y docentes y sirvieron de modelo para la organización de la que sería, posteriormente, la Escuela Iberoamericana de Astrobiología.

Entre 1992 y 1994, el físico venezolano Julián Chela Flores, comenzó a trabajar junto a Cyril Ponnamperuma en el ICTP, allí organizaron tres conferencias internacionales sobre evolución química y exobiología. Luego del fallecimiento de Ponnameruma, Julián Chela Flores, continuó con la tradición

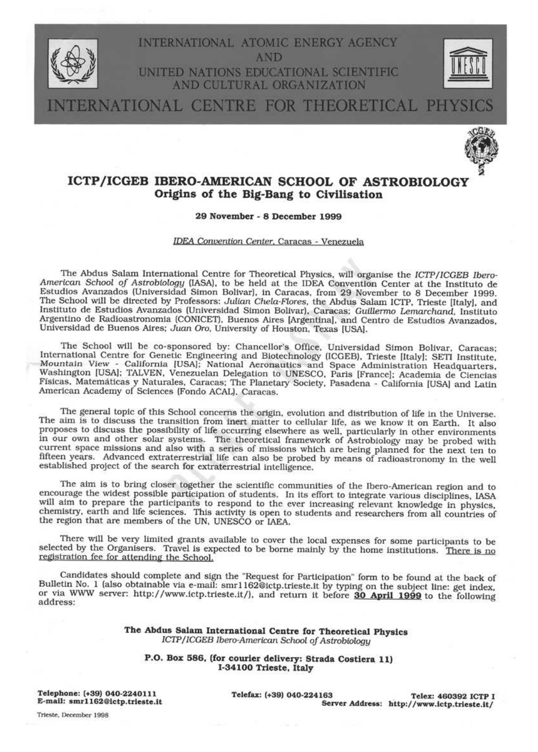


Fig. 11 - Un conjunto de profesores de la Escuela Vida y Cosmos II (Montevideo, 1995). De izq. a der. Ricardo Erlich, actual Ministro de Educación y Cultura de Uruguay, Guillermo A. Lemarchand, Eduardo Mizraji, Luis Elbert, Julio A. Fernández y Gonzalo Tancredi. Foto: Guillermo A. Lemarchand.

iniciada y organizó, entre 1995 y 2003, cuatro conferencias internacionales más. Chela-Flores desempeñó un papel fundamental en promover la participación de jóvenes científicos de América Latina junto a destacadísimas figuras en el campo de la exobiología y astrobiología internacional. En 1999, co-dirigió junto a Joan Oró y el autor, la Primera Escuela Iberoamericana de Astrobiología (Chela Flores et al. 2000).

En 1998 se crea en España el Centro de Astrobiología de Madrid (CAB). Su origen se remonta a la propuesta presentada a la NASA por un grupo de científicos españoles y norteamericanos liderados por Juan Pérez-Mercader para unirse al entonces recién creado NASA Astrobiology Institute (NAI). Después de un minucioso análisis y evaluación de la propuesta y tras un intercambio de cartas a nivel de Gobierno, el CAB fue integrado en el NAI en abril de 2000, convirtiéndose de esta manera en el primer Miembro Asociado al NAI fuera de Estados Unidos. El otro centro Miembro Asociado del NAI es, desde 2003, el Australian Center for Astrobiology.

El CAB fue creado como centro mixto entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y el Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA), y con el apoyo de la Comunidad Autónoma de Madrid (CAM). El entonces presidente del INTA y Secretario de Estado de Defensa, Pedro Morenés y el presidente del CSIC, César Nombela, firmaron el 19 de noviembre de 1999 el acuerdo de constitución sobre la base del acuerdo de cooperación entre ambas instituciones de 1991 siendo director general del INTA el profesor Emilio Varela. Su objetivo inicial fue establecer un entorno investigador verdaderamente transdisciplinar para el desarrollo de la nueva ciencia de la astrobiología, con una nueva y específica contribución de una metodología común basada en las teorías de complejidad y en la aplicación del método científico a la Vida.



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
AND
UNITED NATIONS EDUCATIONAL SCIENTIFIC
AND CULTURAL ORGANIZATION
INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS

ICGEB

ICTP/ICGEB IBERO-AMERICAN SCHOOL OF ASTROBIOLOGY
Origins of the Big-Bang to Civilisation

29 November - 8 December 1999

IDEA Convention Center, Caracas - Venezuela

The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, will organise the *ICTP/ICGEB Ibero-American School of Astrobiology* (IASA), to be held at the IDEA Convention Center at the Instituto de Estudios Avanzados (Universidad Simon Bolivar), in Caracas, from 29 November to 8 December 1999. The School will be directed by Professors: *Julian Chela-Flores*, the Abdus Salam ICTP, Trieste [Italy], and Instituto de Estudios Avanzados (Universidad Simon Bolivar), Caracas; *Guillermo Lemarchand*, Instituto Argentino de Radioastronomia (CONICET), Buenos Aires [Argentina], and Centro de Estudios Avanzados, Universidad de Buenos Aires; *Juan Oro*, University of Houston, Texas [USA].

The School will be co-sponsored by: Chancellor's Office, Universidad Simon Bolivar, Caracas; International Centre for Genetic Engineering and Biotechnology (ICGEB), Trieste [Italy]; SETI Institute, Mountain View - California [USA]; National Aeronautics and Space Administration Headquarters, Washington [USA]; TALVEN, Venezuelan Delegation to UNESCO, Paris [France]; Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas; The Planetary Society, Pasadena - California [USA] and Latin American Academy of Sciences (Fondo ACAL), Caracas.

The general topic of this School concerns the origin, evolution and distribution of life in the Universe. The aim is to discuss the transition from inert matter to cellular life, as we know it on Earth. It also proposes to discuss the possibility of life occurring elsewhere as well, particularly in other environments in our own and other solar systems. The theoretical framework of Astrobiology may be probed with current space missions and also with a series of missions which are being planned for the next ten to fifteen years. Advanced extraterrestrial life can also be probed by means of radioastronomy in the well established project of the search for extraterrestrial intelligence.

The aim is to bring closer together the scientific communities of the Ibero-American region and to encourage the widest possible participation of students. In its effort to integrate various disciplines, IASA will aim to prepare the participants to respond to the ever increasing relevant knowledge in physics, chemistry, earth and life sciences. This activity is open to students and researchers from all countries of the region that are members of the UN, UNESCO or IAEA.

There will be very limited grants available to cover the local expenses for some participants to be selected by the Organisers. Travel is expected to be borne mainly by the home institutions. There is no registration fee for attending the School.

Candidates should complete and sign the "Request for Participation" form to be found at the back of Bulletin No. 1 (also obtainable via e-mail: smr1162@ictp.trieste.it by typing on the subject line: get index, or via WWW server: http://www.ictp.trieste.it/), and return it before **30 April 1999** to the following address:

The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics
ICTP/ICGEB Ibero-American School of Astrobiology

P.O. Box 586, (for courier delivery: Strada Costiera 11)
I-34100 Trieste, Italy

Telephone: (+39) 040-2240111 **Telefax: (+39) 040-224163** **Telex: 460392 ICTP I**
E-mail: smr1162@ictp.trieste.it **Server Address: http://www.ictp.trieste.it/**

Trieste, December 1998

Fig. 12 - Afiche de convocatoria para la Primera Escuela Iberoamericana de Astrobiología (Caracas, 1999)

Durante una reunión celebrada en el Centro de Física Teórica de Trieste en 1997, bajo el liderazgo de Julián Chela Flores y con el apoyo de Joan Oró y el autor, se comenzó a planificar la organización de la Primera Escuela Iberoamericana de Posgrado en Astrobiología. La misma se desarrolló en el Instituto de Estudios Avanzados, en el predio de la Universidad Simón Bolívar, en la ciudad de Caracas (Venezuela), en noviembre de 1999. La Escuela estuvo financiada por el ICTP, la UNESCO, el Centro Internacional de Ingeniería Genética y Biotecnología de Trieste, la NASA, la Universidad Simón Bolívar, la Agencia Espacial Europea, el SETI Institute, The Planetary Society, el Centro Latinoamericano de Física, la Red Latinoamericana de Biología, la Academia de Ciencias de América Latina, las Fundaciones Joan Oró y Alberto Vollmer y el Colegio Emil Friedman. La escuela contó con la participación de una veintena de profesores, en su mayoría de origen iberoamericano y el idioma oficial fue el español. Este hecho generó una altísima sinergia y participación entre los estudiantes y profesores (Chela Flores et al 2000).



Fig. 13 - Co-directores de la Primera Escuela Iberoamericana de Astrobiología. De izq. a der.: Guillermo A. Lemarchand, Julián Chela-Flores, una estudiante, Joan Oró. Foto: G.A. Lemarchand (Caracas, 1999).



Fig. 14 - Participantes de la Primera Escuela Iberoamericana de Astrobiología (Caracas, 1999).

Durante la reunión se propuso la posibilidad de crear una Red Iberoamericana de Astrobiología para promover los estudios en la región, la elaboración de un libro de texto universitario en español acerca de la temática de vida en el universo y otras acciones similares tendientes al fortalecimiento de la cooperación Sur-Sur en esta floreciente rama de la ciencia.

Originalmente, se había convenido organizar la Segunda Escuela de Astrobiología en la ciudad de Oaxaca (México) en el año 2002, en coincidencia con la reunión trienal de ISSOL. Sin embargo, problemas organizativos impidieron concretar dicha iniciativa.

En el año 2006, merced al emprendimiento de Gustavo Porto de Mello, se organizó en la Universidad de Río de Janeiro, un taller sobre Astrobiología que contó con la participación de un centenar de científicos y estudiantes de varias ramas de la ciencia. A principios del 2008, en la Universidad de San Pablo se organizó también un exitoso seminario internacional acerca del Origen de la Vida en la Tierra y en el Universo.

Rápidamente en Chile y Colombia comenzaron a surgir iniciativas similares y aparecieron los primeros grupos de investigación en temas vinculados a la astrobiología.

Durante el año 2009, se celebraron una serie de eventos muy significativos para la astrobiología: Año Internacional de la Astronomía 2009; cuarto centenario de las primeras observaciones telescópicas de Galileo Galilei y de

la publicación de las leyes de Kepler en su libro *Astronomía Nova*; bicentenario de la publicación de la primera teoría de evolución de J. B. Lamarck y del nacimiento de Charles Darwin; sesquicentenario de la publicación del "*Origen de las Especies*", 60 aniversario de la Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe; el cincuentenario de la publicación del primer artículo científico de SETI por G. Cocconi y P. Morrison y del artículo sobre síntesis de moléculas orgánicas en la Tierra primitiva, por Stanley Miller y Harold Urey; y los 10 años de la Primera Escuela Iberoamericana de Astrobiología.

En este contexto, la Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe en cooperación con la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República, organizaron la *Segunda Escuela Iberoamericana de Astrobiología: Del Big Bang a las Civilizaciones* en la ciudad de Montevideo entre el 7 y 12 de septiembre de 2009. El evento fue patrocinado por la Organización de Estados Americanos (OEA), el Centro de Física Teórica Abdous Salam de Trieste (ICTP), la Academia de Ciencias de los Países en Desarrollo (TWAS), el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), el Programa de Desarrollo de Ciencias Básicas (PEDECIBA) y la Dirección de Innovación , Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (DICYT) del Uruguay.

En la misma, participaron alrededor de 70 estudiantes graduados, representando a 16 países de América Latina y el Caribe y una destacada planta de profesores de renombre internacional. Incluso se contó con una clase magistral del pionero Frank Drake, a través de una teleconferencia simultánea con California.

Al igual que lo sucedido durante la primera escuela, se volvió a repetir una gran sinergia y participación entre todos los estudiantes y profesores. Se organizaron conferencias públicas y un taller de maestros y profesores de ciencias del MERCOSUR, que llegó a contar con la participación de más de 200 profesores.

Finalmente, se convino que la Tercera Escuela Iberoamericana de Astrobiología fuera organizada en la ciudad de Barcelona, en el verano boreal de 2011. Su organización estará bajo la tutela del Prof. Jordi Gutiérrez.



Fig. 15 - Los profesores durante la sesión de clausura de la Segunda Escuela Iberoamericana de Astrobiología (Montevideo, 2009). De izq. a der.: Álvaro Giménez, Eduardo Mizraji, Julio A. Fernández, Alicia Massarini, Antígona Segura, Ricardo Amils-Pibernat, Felisa Wolf-Simon, Guillermo A. Lemarchand, Jordi Gutiérrez, César Bertucci, Marcelo Guzmán, Antonio Lazcano, atrás de espalda, Gonzalo Tancredi. No se encuentran en la imagen, Martín Makler y Gustavo Porto de Mello.

4. Epílogo

Los seguidores contemporáneos de las ideas de Epicuro, mantienen en común no solo su convicción de que no estamos solos en el universo, sino también una compresión muy fina acerca del maravilloso fenómeno de la vida y de la necesidad de garantizar su continuidad. Los Epicureanos modernos somos conscientes que es imprescindible hacer que el último factor de la Ecuación de Drake sea lo más longevo posible. Parafraseando a Joan Oró, debemos reflexionar sobre tres principios éticos que se derivan directamente de un mejor conocimiento del cosmos y de la comprensión de los mecanismos que originaron la vida en la Tierra:

Humildad: La vida proviene de simples moléculas

Fraternidad: Toda vida en la Tierra, y el *Homo sapiens* como parte de ella, tiene un origen genético común, que nos demanda solidaridad.

Cooperación: Necesitamos compartir los recursos limitados de nuestro planeta, en una forma sostenible para garantizar la continuidad de la vida en nuestro mundo.

Referencias

Bailey, C., Epicurus "Letter to Herodotus" en W. J. Oates, ed. *The Stoic and Epicurean Philosophers*, New York, 1957, pp. 3-15.

Berthelot, R. L´Astrobiologie et la Pensée de l´Asie: Essai sur les origines des sciences et des théories morales, *Revue de Métaphysique et de Morale*, vol. 39 (3) 1932, vol. 42 (2) 1935 y vol. 44 (3) 1937.

Berthelot, R. *La pensée de l'Asie et l'astrobiologie*, Aux Confines de la Science, Payot, Paris, 1938.

Cameron, A.G.W. ed. *Interstellar Communication*, W.A. Benjamin Inc., 1963.

Cameron, A.G.W. y Ponnamperuma, C. *Interstellar Communication: Scientific Perspectives*, Houghton Mifflin, Boston, 1974.

Campusano, L. E. ed. *ARKA Vida en el Universo*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 1985.

Chela Flores, J.; Lemarchand, G. A. y Oró, J. eds. *Astrobiology: Origins from the Big Bang to Civilization*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000

Cocca, A. A. ed. *Inteligencia Extraterrestre*, Serie Reuniones Académicas, Estudios Internacionales Avanzados, Fundación Casa de la Cultura de Córdoba, Córdoba, 1988.

Cocconi, G. y Morrison, P. Searching for Interstellar Communications, *Nature*, vol.184: 844-846, 1959.

Colomb, F.R. y Lemarchand, G.A. ¿Una aguja en el pajar cósmico? , *Ciencia Hoy*, vol. 1 (5): 36-43 1989.

Colomb, F.R., Martín, M.C. y Lemarchand, **G.A.** SETI Observational Program in Argentina, *Acta Astronautica*, vol. 26: 211-212, 1992.

Fernández, J. A. ed. *Vida y Cosmos: Un enfoque interdisciplinario*, Montevideo, Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República. 1988.

Fernández, J. A. y Mizraji, E. eds. *Vida y Cosmos: Nuevas Reflexiones*, Montevideo, EUDECI, 1995.

Herrera, A. L. *Biología y Plasmogenia*, México, Herrero Hermanos y Sucesores, 1924.

Herrera, A. L. *La Plasmogenia: Nueva ciencia del origen de la vida*, Valencia, Luis Morote, 1932.

Herrera, A. L. A New Theory of the Origin and Nature of Life, *Science*, vol. 96: 14, 1942.

Hoerner, S. von. The Search for Signals from Other Civilizations, *Science*, vol. 134: 1839-1844, 1961.

Kaplan, S.A. ed. *Extraterrestrial Civilizations: Problems of Interstellar Communication*, Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, 1971.

Lazcano Araujo, A. *El origen de la vida*, México, ANUIES, 1977.

Lazcano Araujo, A. y Barreda, A. eds. *El Origen de la Vida: Simpósium conmemorativo en homenaje a Alexander Ivanovich Oparin*, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 1978.

Lederberg, J. Exobiology: Approaches to Life beyond the Earth, *Science*, vol. 132: 393-399, 1960.

Lemarchand, G. A. Jornadas Interdisciplinarias Sobre Vida Inteligente en el Universo, *Astrofísica*, vol. 1 (1): 3-8, 1986.

Lemarchand, G. A. *El llamado de las estrellas*, Colección Lugar Científico, Buenos Aires, Lugar Editorial, 1992.

Lemarchand, G. A. International Astronomical Union Bioastronomy Commission, *Bioastronomy News*, vol. 10 (1): 1-3, 1998.

Lemarchand, G.A. "A New era in the Search for Life in the Universe", en G. A. Lemarchand y K. Meech, eds. *ASP Conference Series*, vol. 213: 7-18, 2000.

Lemarchand, G. A.; Colomb, F.R.; Hurrell, E.E. & Olalde, J.C. Southern Hemisphere SETI Survey: Five Years of Project META II, en C. Cosmovici, S. Bowyer & D. Werthimer eds., *Proceedings of the 5th International Conference on Bioastronomy, IAU Colloquium 161*, Editrice Compository, Bologna, 1997, pp. 611-621.

Levin, G. V., Significance and Status of Exobiology, *Bioscience*, vol. 15: 11, 17-20, 1965.

Manikunian, G. y Briggs, M.H. eds. *Current Aspects of Exobiology,* Oxford, Pergamon Press, 1965.

Mirabel, I.F. Búsqueda de vida extraterrestre: desarrollos recientes y nuevas perspectivas, *Revista Astronómica*, No. 230, julio-septiembre, 1984.

Morrison, P., Billingham, J. y Wolfe, J. eds. *The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI)*, NASA SP-419, Scientific and Technical Information Office, Washington DC.

Oró, J. y Kimball, A. P. Synthesis of Purines under Possible Primitive Earth Conditions, *Archives of Biochemistry and Biophysics*, vol. 94: 217-227, 1961

Oró, J. Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth, *Nature*, vol. 190: 389–390, 1961.

Papagiannis, M.D. ed. *Strategies for the Search for Life in the Universe*, Astrophysics and Space Science Library, vol. 83, Boston, D. Reidel Pub. Co, 1980.

Pereira, F. A. *Introdução a Astrobiologia*, Sociedade Interplanetaria Brasilera, São Paulo, 1956.

Sagan, C. ed. *Communication with Extraterrestrial Intelligence (CETI)*, MIT Press, Cambridge MA, 1973.

Simpson, G.G. The Nonprevalence of Humanoids, *Science*, vol. 143: 769-775, 1964.

The New York Times, Asks Air Silence when Mars when Mars is Near, p. 11, 21 de agosto de 1924.

Varsavsky, C. M. *Vida en el Universo*, Buenos Aires, Carlos Pérez Editor, 1968.

Wallace, A. R. Man's place in the Universe as Indicated by the New Astronomy, *The Fortnightly Review*, March 1, p. 396, 1903.

Wallace, A. R. *Is Mars Habitable? A Critical Examination of Professor Percival Lowell's Book "Mars and its Canals," with an Alternative Explanation,* Londres, Macmillan, 1907.

Capítulo 3

La Zona Habitable Galáctica

Jordi L. Gutiérrez

Resumen La zona habitable galáctica (GHZ) constituye una extensión natural de la zona habitable estelar definida hace ya tiempo. La Galaxia es una estructura de una complejidad extraordinaria, en la que se pueden dar diversos fenómenos astronómicos capaces de afectar sensiblemente al desarrollo de la vida compleja. La metalicidad (entendida como la abundancia de elementos distintos del hidrógeno y del helio) desempeña un papel fundamental: por una parte por su papel esencial en la formación de planetas de tipo terrestre, y por otra al ser imprescindible para la aparición y desarrollo de la vida. Otros efectos, como los debidos a las supernovas y los estallidos de rayos gamma son en la actualidad difíciles de evaluar, pero es probable que puedan causar extinciones masivas en caso de producirse en las inmediaciones de un planeta habitado. A lo largo de este capítulo se estudiarán los ingredientes necesarios para analizar a primer orden la extensión y evolución temporal de la GHZ.

Abstract The Galactic Habitable Zone (GHZ) constitutes a natural extension of the stellar habitable zone defined long ago. In the Galaxy —an extraordinarily complex structure— several astronomical phenomena capable of having significant effects on the development complex life can be found. Metalicity (understood as the abundance of chemical elements different of hydrogen and helium) plays a fundamental role: on the one hand, because it is essential for the formation of terrestrial planets; on the other, because it is necessary for the origin and development of life. Other effects nowadays difficult to account for, as those due to supernovae and gamma ray bursts, could produce mass extinctions if they occurred in the vicinity of an inhabited planet. The inputs required to analyze to first order the extension and temporal evolution of the GHZ will be studied along this chapter.

Jordi Gutierrez (✉)

Departament de Física Aplicada, Escola Politècnica Superior de Castelldefels, Universitat Politècnica de Catalunya, C/Esteve Terradas, 7, 08860 – Castelldefels, España

jordi.gutierrez@upc.edu

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería,* vol. 1, 53 - 76, © 2010 UNESCO-Montevideo.

1. Introducción

Para encontrar vida compleja en nuestra galaxia precisamos indicadores que determinen dónde buscar. Un primer paso en esta dirección nos indica que los planetas de tipo terrestre en órbita alrededor de estrellas de tipo solar (ver contribución de Porto de Mello) son buenos candidatos. Sin embargo, aún no hemos podido detectar ningún sistema de este tipo debido a sesgos en las observaciones.

La idea que a menudo subyace en el estudio de la GHZ es, en cierto modo, la de la Tierra Rara, presentada en el libro homónimo por Ward y Brownlee (2000). La hipótesis con la que trabajan los autores es que la vida a escala microbiana es probablemente muy abundante, pero en cambio la vida compleja –aquella relevante para la comunicación interestelar– es, por el contrario, muy escasa.

Algunos de los riesgos a largo plazo afrontados por la vida compleja están relacionados con eventos astrofísicos (por ejemplo, supernovas) cuya distribución está profundamente influenciada por la estructura galáctica (las supernovas son más frecuentes en la región del bulbo galáctico y en los brazos).

Nuestro objetivo será dar un repaso de los posibles riesgos relacionados con objetos astrofísicos, y esbozar un modelo que permita determinar las regiones de la Galaxia[2] más seguras para la vida. Naturalmente, para definir qué es una región segura para la vida nos centraremos en el único ejemplo de vida que conocemos: la terrestre. Por ello no cabe duda de que se tendrá un cierto sesgo hacia las condiciones que prevalecen en nuestra región de la Galaxia. En nuestro actual nivel de conocimiento, esto es lo máximo a lo que podemos aspirar sin transgredir los límites de la ciencia.

Resulta muy difícil cuantificar estos riesgos, por lo que el estudio de la GHZ se encuentra en su infancia temprana. No obstante esta dificultad, incluso modelos muy simples nos pueden ofrecer información interesante... y la infancia es con frecuencia una de las fases más entretenidas de la vida.

A lo largo de toda la exposición se intentará comunicar las incertidumbres que aún existen (que, de hecho, son mucho más abundantes que las certidumbres, si es que poseemos alguna). Es a lo largo de la exploración de estas

2 La Galaxia, con mayúscula, es nuestra galaxia (a menudo nombrada Vía Láctea, aunque ésta constituye tan sólo una parte de ella). Cuando se habla de otras galaxias, se denotan en minúscula.

incertidumbres –que disminuirán en el futuro– que podremos aprender sobre la distribución galáctica de la vida compleja.

2. Fenómenos astrofísicos relevantes

Los fenómenos sobre los que centraremos nuestra atención son la evolución de la metalicidad[3] galáctica, las supernovas y los estallidos de rayos gamma, las nubes moleculares densas, encuentros cercanos con estrellas, rayos cósmicos y la propia estructura de la Galaxia. Aunque se tratarán por separado, no cabe duda de que muchos de estos fenómenos se hallan íntimamente ligados; a lo largo del texto se resaltarán algunas de sus interrelaciones.

A lo largo de su historia, la Tierra ha experimentado 5 grandes extinciones y varias docenas de extinciones menores. Lo cierto es que contamos con muy pocos datos que expliquen el origen y dinámica de las extinciones (salvo de la sexta gran extinción, la actual de origen antropogénico), y cabe la posibilidad de que algunas de ellas hayan sido causadas por fenómenos astrofísicos.

3. Estructura, dinámica y evolución química de la Galaxia

La Galaxia consta de bulbo (la región central de unos 2 kpc de diámetro), disco (en el que se encuentran los brazos espirales y la barra central), y un halo (de forma aproximadamente esférica constituido por los objetos más antiguos de nuestro sistema estelar y que contiene al bulbo y al disco).

En el centro galáctico se tiene una buena ilustración de una zona inhabitable de la Galaxia, ya que allí se asienta un agujero negro supermasivo cuyas emisiones de alta energía y su mera gravedad hacen que la vida compleja en sus inmediaciones sea imposible (al menos tal como la conocemos).

El disco consta de dos estructuras claramente diferenciadas: el disco grueso, de baja metalicidad promedio y edad elevada, y el disco delgado –al cual pertenece el Sol–, de metalicidad más alta y edad menor. En el disco se encuentran los brazos espirales, el lugar donde se forman estrellas en la Galaxia. Aunque son claramente discernibles, se trata únicamente de ondas de

---

3 En astrofísica, todos los elementos distintos del hidrógeno y del helio se agrupan bajo el término metales. Por consiguiente, la metalicidad es la abundancia de metales en un medio (ya sea la atmósfera de una estrella, el medio interestelar, una nube molecular...).

densidad de materia; en estas zonas de densidad local elevada es donde se forman las nebulosas en cuyos interiores nacen las estrellas. Pero eso no implica que entre los brazos no exista nada; de hecho, la densidad de estrellas y gas es prácticamente constante a lo largo de todo el disco, con sólo una dependencia radial (la densidad disminuye hacia el exterior de la Galaxia), y no azimutal.

La Galaxia posee un total de cuatro brazos, además de una barra central que la convierte en una galaxia de tipo SBb o SBc. En la actualidad el Sol se encuentra en el espacio situado entre dos brazos (el de Perseo y el de Sagitario-Carina), hecho que algunos han interpretado como un factor esencial en la habitabilidad de la Tierra.

La posición del Sol en nuestra Galaxia lo sitúa cerca del círculo de corotación (Fernández et al., 2001, Dias y Lépine, 2005), en el cual la velocidad angular de los brazos espirales es igual a la velocidad angular orbital de las estrellas (suponiendo que describan órbitas circulares). Se ha postulado que dicha proximidad es un factor importante en la habitabilidad de la Tierra, ya que hace mucho menos frecuentes los pasos de nuestro sistema por el interior de los brazos espirales, donde se dan la mayor parte de supernovas gravitatorias, y donde se encuentran casi todas las nubes moleculares gigantes. Diversos autores (Leitch y Vasisht, 1998; Gies y Helsel, 2005) han relacionado los pasos del Sol a través de los brazos espirales con perturbaciones climáticas, pero un estudio reciente de Overholt et al. (2009) con un modelo galáctico más refinado apunta a que no existe tal correlación entre clima y brazos espirales.

El radio del círculo de corotación es de unos 8,3 kpc (Amôres, et al., 2009), mientras que el del Sol es de 7,5 kpc. Un efecto del círculo de corotación es la aparición de una región con una densidad anómalamente baja de gas (visible especialmente por su déficit en HI), que actúa como una barrera para el transporte radial de metales. Para que tal estructura exista es preciso que las ondas de densidad espirales sean estables a lo largo de períodos de tiempo extensos.

En la actualidad no disponemos de modelos dinámicos autoconsistentes de la Galaxia, por lo que en este aspecto hay que limitarse a una simulación simple de la estructura de nuestro sistema estelar. Los brazos espirales y la barra central se pueden simular de una forma bastante grosera ajustando curvas simples, como la espiral (Binney y Tremaine, 1987)

$$r(\phi) = r_0\, e^{k\phi}$$



Fig. 1 - Representación artística de la Galaxia donde se aprecia la orientación y extensión de la barra central (imagen cortesía NASA/JPL-CalTech).

donde *r* es la distancia al centro de la Galaxia, y ϕ es el azimut. La constante k, está relacionada con el ángulo de apertura *P* de la espiral

$$P = \tan^{-1} k$$

y

$$\cot(P) = r(\phi)\frac{d\phi}{dr}$$

Aparece con este modelo el problema de que el ángulo de apertura de la espiral no es constante en las galaxias.

Existen algunas alternativas en la literatura. Una muy reciente y que permite simular de forma natural la existencia de la barra es (Ringermacher y Mead, 2009)

$$r(\phi) = \frac{A}{\log\left[B\tan\left(\phi/2N\right)\right]}$$

donde A, B y N son parámetros ajustables; el primero nos proporciona la escala del sistema, mientras que la combinación de B y N nos dan un ángulo de apertura variable muy similar al encontrado en galaxias espirales reales.

El potencial gravitatorio de la Galaxia y su distribución de masa se pueden obtener de Dehnen y Binney (1998), que proporcionan expresiones analíticas simples (pero precisas) de la distribución de masa en el disco de la Galaxia y del potencial gravitatorio. Esto permite obtener la curva de rotación del disco galáctico con buena aproximación.

No existe tampoco un modelo completo que nos permita describir la formación y evolución química de la Galaxia. Uno de los modelos más exitosos es el de Chiappini et al. (1997, 1999); en estos trabajos, se postula que la Galaxia se formó a lo largo de dos fases separadas de acreción de gas intergaláctico: la primera formó el halo, el bulbo y el disco grueso, mientras que en la segunda se formó el disco delgado. El ritmo de acreción en ambas fases disminuye de forma exponencial con el tiempo, de modo que la densidad de gas σ evoluciona como

$$\frac{d\ \sigma(r,t)}{d\ t} = A(r)\ \exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right) + B(r)\ \exp\left(\frac{t-t_{\max}}{\tau_D}\right)$$

donde *r* es la distancia al centro de la Galaxia, *t* el tiempo, τ_T y τ_D los tiempos característicos de acreción de materia para formar el halo y el disco grueso, y para formar el disco delgado, respectivamente, y t_{max} es el instante de máximo ritmo de acreción sobre el disco delgado (que corresponde con el fin de la acreción sobre el halo, bulbo y disco grueso). A y B son parámetros que se fijan exigiendo que el modelo reproduzca la densidad de gas observado en la actualidad (cuando *t*, la edad de la Galaxia, es de unos 13 Gyr).

Para seguir la evolución química del gas se necesita saber cuánto de éste se transforma en estrellas por unidad de tiempo, determinar cuál será la distribución de masa de las estrellas formadas, y analizar cuál será la evolución de estas estrellas (tiempo de vida, resultado final de la evolución, abundancias químicas del gas expulsado por las estrellas...). Veamos cada uno de estos aspectos por separado, de los que cabe destacar que todavía están sujetos a amplias incertidumbres.

La tasa de formación estelar (*Star Formation Rate*, SFR) predice qué fracción del gas se transformará en estrellas por cada unidad de tiempo. Existen diversos modelos para la SFR, pero uno particularmente apropiado para estudios de evolución química es el de Hernquist y Springel (2007), en el que la SFR viene dada por

$$\dot{\rho}_*(t) = \dot{\rho}_*(0)\frac{\chi}{1+\alpha(\chi-1)^3\exp\left(\beta\chi^{7/4}\right)}$$
$$\chi(z) = \left[\frac{H(z)}{H_0}\right]^{2/3}$$
$$\alpha = 0{,}012$$
$$\beta = 0{,}041$$
$$\dot{\rho}_*(0) = 0{,}013 M_{Sol}\, yr^{-1}\, Mpc^{-3}$$
$$H(z) = H_0\left[\Omega_M(1+z)^3 + (1-\Omega_M-\Omega_\Lambda)(1+z)^2 + \Omega_\Lambda\right]^{1/2}$$

donde Ω_M y Ω_Λ son, respectivamente, la densidad de masa y de energía oscura en unidades de densidad crítica del Universo, H_0 la constante de Hubble (70 km s^{-1} Mpc^{-1}), y $\dot{\rho}_*(0)$ es la SFR en el origen de la Galaxia. Los autores afirman que el error máximo en esta SFR es de un 10%.

La formación estelar no se produce con igual intensidad en todo el disco galáctico, sino que se concentra en el borde de ataque de los brazos espirales, motivo por el que estos son tan conspicuos.

La función de masas iniciales (*Initial Mass Function*, IMF) describe cómo se distribuye la masa que pasa de gas interestelar a formar estrellas. La prescripción más empleada es la de Salpeter

$$\xi(m) = \xi_0(m)\cdot m^{-\alpha}$$

donde α adopta un valor de 4/3 o 5/3, y ξ_0 es un factor de normalización. Así, el número de estrellas en un rango de masas específico se puede expresar como

$$N(m_1, m_2) = \int_{m_1}^{m_2}\frac{\xi(m)}{m}\,dm$$

Esta IMF es válida únicamente para estrellas formadas a partir de gas con una Z mayor que $\sim 10^{-3}$–10^{-4}. Las estrellas con metalicidad menor (las de población III) deberían seguir una IMF muy distinta, con una preponderancia muy marcada de estrellas de algunos cientos de masas solares, o tal vez seguir una distribución bimodal con picos a $\sim 10\ M_\odot$ y $\sim 100\ M_\odot$ (Nakamura y Umemura, 2001).

La IMF de Salpeter muestra que las estrellas de baja masa son mucho más frecuentes que las de masa elevada. Las estrellas con masa superior a unas 8 masas solares acaban su vida explotando como supernovas (ver un poco más abajo), mientras que las que están entre 0,7 y 8 masas solares formarán una nebulosa planetaria –que *contaminará* el medio interestelar con metales– y una enana blanca.

En un modelo de GHZ en el que se desee estudiar la evolución de un gran número de estrellas de masa baja e intermedia se pueden emplear las expresiones de evolución estelar sintética de Hurley et al., (2000); con ellas se puede seguir con notable precisión la evolución estelar de estos objetos sin necesidad de complejos códigos numéricos que determinen el estado evolutivo de cada una de las estrellas por separado. Para determinar el enriquecimiento de metales por parte de estas estrellas se puede usar las tablas de Marigo et al. (1996), aunque con el inconveniente de que solo contemplan estrellas hasta 4 masas solares, o de van den Hoek y Groenwegen (1997), que cubre todo el rango de masas de interés.

Existen diversos trabajos sobre la composición de la materia eyectada por las supernovas, pero uno de los más empleados es el de Woosley y Weaver (1995) que proporciona la nucleosíntesis de estrellas entre 11 y 40 masas solares para varias metalicidades distintas. La nucleosíntesis debida a las supernovas termonucleares se puede obtener de Thielemann et al. (1993). Su relevancia queda de manifiesto si se considera que aproximadamente dos tercios del hierro de la Galaxia se ha formado en la explosión de supernovas termonucleares.

4. Metalicidad y formación planetaria

Aunque es obvio que existe relación entre la abundancia de metales y la existencia de planetas terrestres, la forma exacta de dicha relación está lejos de ser evidente. Hasta el momento, la capacidad de nuestros telescopios provoca un sesgo innegable en el tipo de planetas fácilmente detectables: objetos de masa elevada, a distancias moderadas o incluso pequeñas de la estrella central. Eso no significa que este tipo de objetos (gigante caliente) sea el más común en la Galaxia, sino sólo que son los que podemos detectar.

No cabe duda de que existe una correlación entre la metalicidad de una estrella enana y la probabilidad de que albergue planetas gigantes, pero la interpretación de este hecho no es evidente. González (1999) afirma que se trata de una necesidad intrínseca, y que todas las estrellas con planetas son anóma-

las, tanto por lo que se refiere a su abundancia de metales como a sus propiedades cinemáticas. Por el contrario, Haywood (2009) ofrece una explicación alternativa más satisfactoria (por estar más cercana a las observaciones): que las estrellas de alta metalicidad con planetas gigantes provienen del disco interno, y que la presencia de esos planetas se debe a la mayor abundancia de H_2 en la región donde se formaron las estrellas.

Algunas estrellas con planetas pertenecen al disco grueso (que es más antiguo que el disco delgado al que pertenece el Sol), lo que sería una prueba de que la formación de planetas se remonta a épocas muy cercanas a la formación de la Galaxia. Si los modelos de formación galáctica son correctos, las estrellas más antiguas del disco grueso se formaron 1-2 Gyr después del nacimiento de la Galaxia.

Observaciones recientes (Yasui et al. 2009) indican que los discos protoplanetarios en estrellas situadas en el borde exterior de la Galaxia (a unos 18 kpc del centro) tienen una vida mucho más corta que en la vecindad solar. La diferencia es de alrededor de un factor 5, aunque el mecanismo implicado todavía está en discusión. Esta podría ser una explicación natural a la correlación entre metalicidad de la estrella, la existencia de planetas gigantes masivos, y sus semiejes mayores: a mayor metalicidad mayor longevidad del disco, más tiempo disponible para que un planeta gigante acrete masa e interaccione con el gas y migre hacia la estrella.

Lineweaver (2001) ha cuantificado los efectos de la metalicidad en la probabilidad de formar y conservar planetas de tipo terrestre. El autor supone que la probabilidad de formar planetas aumenta linealmente con la Z, y usa la relación observada entre [Fe/H] [4] y la masa de los planetas extrasolares de tipo gigante caliente para determinar qué fracción de estrellas puede formar tierras y en qué fracción de dichas estrellas la migración de un planeta gigante destruye los planetas terrestres. Los resultados implican que a partir de la Z solar los planetas terrestres son destruidos por los gigantes gaseosos durante su migración en la mayoría de los sistemas exoplanetarios.

Parece que la masa de los planetas terrestres crece (algo más rápido que linealmente) con la masa del disco protoplanetario debido a las interacciones entre los embriones. Así, como existe una cierta correlación entre la masa de la estrella y la del disco que la rodea, es de esperar que en estrellas de baja masa, los planetas formados sean también de baja masa (Raymond et al. 2007), si bien se conocen ejemplos de estrellas de baja masa rodeadas

4 En astrofísica $[X/Y] = \log_{10}(X/Y)_{*} - \log_{10}(X/Y)_{\odot}$, donde X e Y son dos elementos químicos cualesquiera y los subíndices se refieren a la estrella (símbolo $*$) y al Sol (símbolo $\odot$).

por discos masivos. Otra propiedad del disco que afecta a los planetas de tipo terrestre es la dependencia radial de la densidad de materia: para discos con dependencias fuertes, los planetas terrestres se forman más rápidamente y más cerca de la estrella, son más ricos en hierro y posean menos volátiles (Raymond et al. 2005a)

La presencia de un planeta de tipo Júpiter caliente (o gigante caliente) se explica por fenómenos de migración desde distancias mucho mayores (algunas unidades astronómicas) a las observadas en la actualidad. En principio, en un sistema planetario ya formado (en el que prácticamente toda la masa del disco se ha acretado en forma de planetas o se ha dispersado), la migración de un planeta gigante hasta las cercanías de la estrella central implica la destrucción o eyección de los planetas existentes en la zona habitable. Sin embargo, la migración de un planeta gigante en un disco protoplanetario induce la circularización de embriones situados en órbitas más alejadas, facilitando así la formación de nuevos planetas que de otra forma no hubieran existido (Armitage, 2003; Raymond et al., 2006), aunque la eficiencia de formación se reduce notablemente. Por otra parte, las interacciones gravitatorias del gigante pueden también ocasionar la formación de planetas de tipo terrestre muy cerca de la estrella. La habitabilidad o la estabilidad orbital de este tipo de planetas aún no han sido completamente exploradas (Raymond et al., 2005b).

5. Supernovas y estallidos gamma

Existen dos tipos fundamentales de supernova, las gravitatorias (de tipos espectrales II, Ib y Ic), y las termonucleares (de tipo Ia). Las supernovas gravitatorias representan la explosión de estrellas masivas (más de unas 8 masas solares), mientras que las termonucleares son la explosión de una enana blanca de carbono-oxígeno (los restos de estrellas de entre 0,8 y unas 8 masas solares) en un sistema binario.

Desde el punto de vista de la habitabilidad galáctica, las supernovas desempeñan dos papeles. Por una parte –como se comentó un poco más arriba– contaminan el medio interestelar con elementos pesados (como, por ejemplo,el hierro), siendo, por ello, los grandes motores de la evolución química de la Galaxia, junto con las estrellas AGB y SAGB[5]; por otra, la enorme energía

5 Las estrellas AGB, por *Asymptotic Giant Branch* en inglés, son estrellas gigantes rojas que corresponden a un estado evolutivo tardío de estrellas de masa intermedia (0,6 a 10 $M_{\odot}$). Las SAGB, o *Super AGB*, son estrellas en el rango de masa de 7 a 12 $M_{\odot}$ que alcanzan la fusión de carbono.

liberada durante su explosión puede afectar a planetas relativamente cercanos (menos de unos 10 pc). Vamos a tratar con algo más de detalle cada una de estas facetas.

La nucleosíntesis de las supernovas depende en gran medida de su tipo. Las de tipo termonuclear son las principales fuentes de elementos del pico del hierro (Fe, Co, Ni, fundamentalmente). Estas supernovas se producen en sistemas binarios relativamente viejos, en los que una enana blanca de carbono-oxígeno acreta materia de su compañera. Cuando se supera el límite de Chandrasekhar, la presión de los electrones degenerados es incapaz de soportar el peso de la estrella que empieza a contraerse. Dicha contracción provoca la ignición explosiva del carbono, produciéndose así alrededor de 0,6 masas solares de elementos del pico del hierro, además de elementos de masa intermedia (Ca, Si, Mn, Zn, entre otros).

Los progenitores de las supernovas gravitatorias son estrellas masivas, que se encuentran únicamente en regiones de formación estelar activa (pues su vida es muy corta, siempre inferior a unos 25 millones de años). Por lo tanto, este tipo de supernovas se asocia a los brazos espirales de la Galaxia. No es éste el caso de las supernovas termonucleares, que se forman a partir de sistemas binarios de elevada edad (aunque recientemente se ha apuntado la existencia de dos poblaciones de edades distintas que dan lugar a este tipo de supernovas; Manucci et al., 2006) y su distribución es independiente de los brazos.

Se observa una clara concentración en el número de supernovas hacia el centro de las galaxias espirales. El motivo es simple: la densidad estelar es mayor en las regiones cercanas al centro que en las más alejadas. Recientemente, Boissier y Prantzos (2009) han analizado el catálogo de Asiago de supernovas (Barbon et al., 1989) y han determinado ajustes empíricos a la tasa de supernovas (y a la frecuencia relativa de los distintos tipos) en función de la distancia al centro de las galaxias, de su luminosidad y de la metalicidad local.

La emisión inicial de las supernovas consiste en un flash de UV y rayos X blandos que pueden tener efectos sustanciales sobre una atmósfera de tipo terrestre. Se ha observado que los estallidos de alta energía (por ejemplo, detonaciones de armas nucleares en el espacio) crean óxidos de nitrógeno, NOx (sobre todo NO y NO_2), que catalizan la disociación del ozono. Estudios detallados de la densidad de ozono por Ruderman y Chamberlain (1975) confirman asimismo una estrecha relación entre la densidad de NOx y el periodo solar de 11 años.

Ruderman (1974), en un trabajo pionero que no obstante pasó casi inadvertido, estudió los efectos de la radiación gamma y de los rayos cósmicos producidos por supernovas sobre la capa de ozono. En este trabajo se da una estimación simple (aunque no muy precisa) de la cantidad de ozono perdida:

$$\frac{O_3}{O_{3,0}} = \frac{\left(16 + 9x^2\right)^{1/2} - 3x}{2}$$

donde

$$x = \frac{[NO_x]}{[NO_x]_0}$$

es la razón de abundancia de óxidos de nitrógeno previa a la explosión (con el subíndice 0), y tras ella (sin subíndice). Posteriormente, Ellis y Schramm (1995), Crutzen y Brühl (1996) extendieron el estudio con mejores modelos químicos de la atmósfera, determinando que en las regiones ecuatoriales la capa de ozono se reduciría en un 20%, disminución que aumentaría hasta el 60% en las regiones polares. En años recientes, B. Thomas y A. L. Melott han refinado considerablemente los modelos, aunque cualitativamente el escenario continúa siendo el mismo. La reducción en la abundancia de ozono puede durar varios años, y Además, el dióxido de nitrógeno es un gas de alta opacidad, lo que podría reducir la irradiación solar en el visible, añadiendo un nuevo factor que contribuiría a desestabilizar la biosfera (Thomas, 2005). Gehrels et al. (2003) muestran que una supernova situada a menos de 10 pc reduciría la capa de ozono terrestre en un 20–40 %.

Niveles elevados de NO_2 pueden quedar registrados en el hielo antártico perenne en forma de anomalías en la abundancia del ión nitrato (Ilyudin 2002). El aumento de nitratos causado por los flares solares de 1972 y 2003 (de enorme intensidad) representan una referencia excelente para analizar los posibles aumentos debidos a supernovas cercanas. Además, el bajo tiempo de residencia del NO_2 en la atmósfera (unos 3 años) permitiría datar el evento con gran precisión.

La explosión de una supernova cercana (a menos de 10 pc) comprimiría la heliosfera hasta aproximadamente 1 AU (Fields et al., 2008), suponiendo que las propiedades del viento solar sean comparables a las observadas en

la actualidad. En estas condiciones, la Tierra estaría sujeta a un considerable bombardeo por rayos cósmicos, ya que la remanente de supernova estaría muy cerca, y la heliosfera no sería una protección efectiva. Este tipo de explosiones cercanas produciría además la deposición de isótopos inusuales en nuestro planeta; éste podría ser el caso del estrato rico en ^{60}Fe (un isótopo radioactivo del hierro cuya vida media es de $2{,}62 \pm 0{,}04 \times 10^6$ años) hallado en la corteza oceánica de hace 2,8 millones de años (Knie et al., 1999, 2004), y cuyo origen se encuentra muy probablemente en una supernova cercana (entre unos 20 y unos 100 pc;). No obstante, Basu et al. (2007) afirman que la relación $^3He/^4He$ de esos mismos estratos podría indicar que el ^{60}Fe se ha producido en micrometeoritos por la acción de los rayos cósmicos y por tanto la acumulación de ^{60}Fe indicaría tan solo un incremento en la densidad de meteoroides en el entorno de la Tierra. Para acabar de complicar la situación, Fitoussi et al. (2008) no han podido hallar ^{60}Fe en muestras de los estratos de Knie et al. (1999, 2004).

Casi el 99% de la energía liberada por una supernova gravitatoria (10^{53} erg) escapa en forma de unas partículas sumamente sutiles, los neutrinos, cuya interacción con la materia es minúscula. No obstante, Collar (1996) propuso que la ingente energía transportada por dichos neutrinos podría dar lugar a mutaciones; calculó que el número de focos malignos por kilogramo se podía determinar por medio de

$$\langle MF \rangle \approx 490 \left(\frac{d}{1\,pc} \right)^{-2}$$

donde d es la distancia hasta la supernova medida en parsecs. Cossairt y Marshall (1997) y Collar (1997) entablaron una disputa sobre la verosimilitud de este resultado. Aunque Collar (1997) afirmaba que la situación no se resolvería hasta hacer experimentos con células vivas, tal experimento no ha sido realizado todavía.

Los estallidos de rayos gamma (GRBs, por sus siglas en inglés –*gamma ray bursts*–) se dividen en eventos cortos (duración inferior a dos segundos) y largos (de más de dos segundos), que representan la gran mayoría. Los GRBs largos parecen estar relacionadas con la explosión de supernova de progenitores muy masivos en galaxias relativamente jóvenes y de baja metalicidad (Woosley y Heger, 2006), de manera que éste es un riesgo que va disminuyendo con el tiempo (a medida que aumenta la abundancia de metales en la Galaxia;

Fruchter et al, 2006; Stanek et al., 2006). Durante su máximo de emisión, los GRBs largos pueden ser los objetos más brillantes del cielo gamma. Se cree que los rayos gamma se emiten intensamente colimados, aunque las energías implicadas son inmensas, pues se encuentran a enormes distancias.

Resulta mucho más difícil explicar el origen de los GRBs cortos, aunque se especula con que se trataría de sistemas dobles formados por dos estrellas de neutrones o una estrella de neutrones y un agujero negro. Cuando dos objetos tan masivos y compactos orbitan uno alrededor del otro emiten considerables cantidades de energía en forma de radiación gravitatoria. Con el tiempo, varios cientos de millones de años o unos pocos miles de millones de años, dependiendo de los parámetros orbitales iniciales del sistema, ambos objetos pueden llegar a coalescer, dando lugar al GRB corto.

En todo caso, la incidencia de la radiación gamma de un GRB cercano representaría un riesgo muy importante para la habitabilidad de un planeta de tipo terrestre, como muestra el incremento en el estado de ionización de la ionosfera tras la explosión de algunos GRBs (como el 030329; Maeda et al., 2005) o como muestra el hecho de que la emisión óptica de GRB080319B fue visible a simple vista, aunque acaeció a un corrimiento al rojo de $z = 0{,}937$, es decir, a unos 3160 Mpc de distancia. Como la inmensa mayoría de los GRBs, este último tuvo lugar en un entorno de baja metalicidad (una galaxia enana y poco luminosa).

Probablemente, las explosiones de supernova y de GRBs son capaces de generar burbujas de baja densidad en el medio interestelar, similares a las que se encuentran en las proximidades del Sol (Maíz-Apellániz 2001, Benítez et al. 2002, Wheeler y Scalo 2002). Estas burbujas son relevantes debido a que la disminución en la densidad de hidrógeno aumenta la exposición UV, especialmente si un planeta habitado se encuentra en las proximidades de una asociación OB (Benítez et al., 2002) en las que en un intervalo corto de tiempo se pueden producir varias supernovas. Se ha propuesto (Gehrels y Chen, 1993) que la supernova que dio lugar a Geminga, una de las estrellas de neutrones más cercanas (unos 40–400 pc) fue la que causó la burbuja del medio interestelar local, con su alta temperatura (10^6 K) y baja densidad (5×10^{-3} cm^{-3}).

6. Rayos cósmicos

Los rayos cósmicos (CRs) son partículas de alta energía, probablemente originadas en restos de supernovas, que parecen provenir de todas las direcciones debido a los efectos del campo magnético galáctico (ver Ferrari y Szuszkiewicz, 2008 para una revisión). En su mayoría son protones o partículas alfa, aunque aproximadamente un uno por ciento son partículas de mayor masa (incluidos núcleos de hierro) cuya gran energía los hace muy dañinos. Su espectro de energía va desde unos pocos keV hasta algunos 10^{15} eV, si bien se han detectado unos pocos rayos cósmicos de energía mucho mayor (hasta 10^{21} eV).

La atmósfera de la Tierra y su magnetosfera actúan como escudos muy efectivos contra este tipo de radiación. No obstante, la interacción de los CRs con las moléculas de la alta atmósfera produce cascadas de partículas secundarias capaces de penetrar la atmósfera hasta la superficie de la Tierra. Se estima que entre un 30 y un 40% de la dosis de radiación anual en la superficie de la Tierra se debe a esta causa.

Existe una modulación del flujo de rayos cósmicos congruente con la fase de actividad solar. Cuando el Sol está en su fase más activa, la heliosfera se convierte en un escudo muy efectivo contra los CRs, mientras que en el mínimo de actividad solar se produce un incremento considerable del flujo de CRs por el debilitamiento de su campo magnético.

Ocasionalmente el campo magnético de la Tierra disminuye su intensidad hasta desaparecer, y reaparece cambiado de polaridad. Durante estos cambios, la Tierra está menos protegida de este tipo de radiación, lo que combinado con un incremento de la intensidad de CRs podría dar lugar a tasas de mutación muy elevadas.

En 2005, análisis realizados sobre la biodiversidad de los géneros marinos (cuyo registro fósil es más completo) a lo largo del fanerozoico mostraron la existencia de una variación cíclica en aquella, con un periodo de unos 62 millones de años (Rohde y Muller, 2005), que fue confirmada posteriormente por Melott (2008) empleando una base de datos distinta, lo que casi descarta la posibilidad de algún sesgo o artefacto estadístico.

Existe un gran número de causas potenciales para esta periodicidad, pero Medvedev y Melott (2007) mostraron que una causa astronómica explica tanto la extensión del periodo como la posición de los picos de ambos; la correspondencia es tan elevada que la probabilidad de que se deba al azar es de una

entre varios miles. El mecanismo es el siguiente: a lo largo de su órbita en torno del centro galáctico, el Sol realiza excursiones de casi 100 pc por encima y por debajo del plano del disco. Cuando su posición está por encima del plano galáctico, el Sol se ve expuesto a un flujo de rayos cósmicos casi 5 veces mayor que en la actualidad, cuando estamos muy cerca del plano. El motivo es que en el hemisferio norte galáctico se encuentra el cúmulo de Virgo, hacia el que cae el grupo local a una velocidad de unos 200 km/s, y esto comprime la magnetosfera de la Galaxia, permitiendo que los rayos cósmicos intergalácticos aumenten su flujo sobre el sistema solar. En cambio, por debajo del plano galáctico se produce una disminución del flujo de rayos cósmicos.

Si bien el efecto de dicho incremento en el flujo de rayos cósmicos no produce efectos a corto plazo, a lo largo de cientos de miles o unos pocos millones de años su efecto acumulado puede ser suficiente para afectar notablemente a la biodiversidad.

Durante mucho tiempo se ha especulado con la posible relación entre el flujo de rayos cósmicos y el clima terrestre. La confirmación del efecto climático de la variación en la actividad solar (en ciclos de 11 años) representó un espaldarazo esencial para esta teoría. Según la teoría más aceptada, los rayos cósmicos interaccionan con las moléculas de la alta atmósfera y las ionizan; estas moléculas ionizadas se convierten en precursores de nucleación para las gotas de agua que forman las nubes (Kirkby 2008 ofrece una revisión muy completa). Por tanto, se cree que los CRs intervienen de forma esencial en el origen de la formación de nubes a baja altura. Es de esperar que un aumento en el flujo de CRs cause también un aumento de la cubierta nubosa, con evidentes efectos en el clima. No obstante, todavía existen incertidumbres considerables en esta teoría (ver, por ejemplo, Carslaw 2009). Futuros experimentos y más observaciones en la alta atmósfera aclararán el panorama.

7. Encuentros con estrellas cercanas

La densidad estelar en el disco y bulbo galácticos es, con mucho, excesivamente baja como para que se deba tener en cuenta la posibilidad de choque directo entre dos estrellas (no así en entornos más densos, como los cúmulos globulares, donde las estrellas *blue straggler* parecen originarse en la colisión entre dos estrellas).

Por el contrario, el paso de una estrella por la vecindad de otra debe ser un fenómeno relativamente común, en especial en las regiones de mayor den-

sidad estelar. Dicho acercamiento podría desestabilizar los núcleos cometarios de la nube de Oort de la estrella y generar una intensa lluvia de cometas, con el consiguiente riesgo de impacto. Tal fenómeno pudo acaecer al final del eoceno (Farley et al., 1998), como podría indicar la formación de algunos grandes cráteres en la Tierra en esta época, así como la acumulación de isótopos de origen extraterrestre en sedimentos coetáneos; no obstante esta interpretación ha sido discutida por Tagle y Claeys (2004).

En principio este riesgo es mayor en el bulbo por dos motivos; como ya se ha comentado, la densidad estelar es mayor allí, pero además la elevada metalicidad facilitaría la formación de abundantes cometas, y con ello de nubes de Oort muy pobladas. Por otra parte, también hay que tener en cuenta que los acercamientos frecuentes de otras estrellas podría disgregar en un tiempo relativamente corto la nube de Oort, y así este riesgo podría quedar circunscrito a la infancia de las estrellas de dicha región.

Tales tipos de interacción son mucho menos frecuentes en el disco galáctico, como demuestra la existencia de nuestra nube de Oort y del cinturón de Kuiper, pero no por ello son imposibles. Búsquedas recientes de estrellas que puedan interaccionar con nuestra nube de Oort no han ofrecido ningún candidato (García-Sánchez et al., 1999, 2001; Frogel y Gould, 1998).

8. Un esquema para computar la GHZ

La GHZ, como cualquier análisis de riesgos, sólo se puede definir en términos de probabilidades; en este caso, la probabilidad que nos ocupa es la de supervivencia de la biosfera durante periodos del orden de 4 Gyr. La manera más simple de calcular dicha probabilidad consiste en suponer que los diferentes fenómenos involucrados (supernovas cercanas, formación de gigantes calientes, y de tierras) son independientes (Lineweaver et al., 2004), de manera que

$$P_{GHZ} = SFR \times P_{SN} \times P_{evol} \times P_{HE}$$

la SFR empleada puede ser la de Hernquist y Springel (2003), ya citada anteriormente, pero existen diversas prescripciones alternativas utilizables.

El término P_{SN} evalúa la probabilidad de que los organismos complejos de un planeta sean eliminados por la acción de una supernova cercana. Para calcularla, los autores integran la tasa de supernovas para cada radio galactocéntrico y la normalizan a la misma cantidad calculada para las cercanías

del Sol. Si esta razón es inferior a 0,1 consideran que P_{SN}=1 (y por ello las supernovas no serían un riesgo), mientras que si la razón supera 4 (es decir, el cuádruple de la encontrada en las cercanías de la Tierra) entonces P_{SN}=0 y la vida compleja es inviable en esa región galáctica.

En nuestro planeta se han necesitado unos 4.000 millones de años para que aparezcan organismos complejos (aunque estrictamente hablando el Fanerozoico indica sólo la aparición de organismos fácilmente fosilizables). Lineweaver et al. (2004) adoptan este valor como la duración típica para el desarrollo de organismos complejos y determinan la probabilidad de su aparición integrando una distribución normal de media 4.000 millones de años y dispersión 1.000 millones de años. Éste es el término P_{evol} de la última ecuación.

Lineweaver (2001) da una estimación de la probabilidad para que un sistema albergue planetas terrestres:

$$P_{HE} = P_{FE}\left(1 - P_{DE}\right)$$

donde P_{FE} es la probabilidad de formar planetas terrestres y P_{DE} es la probabilidad de que gigantes en migración los destruyan una vez formados. Ambas cantidades dependen de la Z de la estrella:

$$\begin{aligned} &P_{FE} \propto Z \\ &P_{FE} = 0 \qquad Z < 0{,}1\,Z_{Sol} \\ &P_{FE} = 1 \qquad Z > 4\,Z_{Sol} \end{aligned}$$

$$P_{DE} = \frac{N_{HJ}(Z)}{N(Z)}$$

siendo $N_{HJ}(Z)$ y $N(Z)$ el número de estrellas que tienen gigantes calientes y el número de estrellas total en un intervalo de metalicidad. Estos números vienen determinados por las observaciones.

Esta probabilidad excluye la existencia de planetas terrestres en sistemas donde exista un gigante cercano a la estrella; como se ha visto algo más arriba, la situación no es ni mucho menos tan clara, y probablemente permanecerá así hasta que las observaciones confirmen una u otra posibilidad. Existe sin embargo un amplio margen de mejora en la evaluación de esta probabilidad

usando las observaciones de sistemas planetarios extrasolares y las simulaciones numéricas disponibles en la literatura.

Combinando estas probabilidades con un modelo de evolución química de la Galaxia (Fenner y Gibson, 2003), estos autores llegan a la conclusión de que la GHZ tiene forma de anillo, y que este anillo (cuyo radio inicial era de unos 7,5 kpc) se ha ido ensanchando con el tiempo. En la actualidad, su GHZ se extiende desde unos 4 kpc hasta unos 10 kpc (ver Figura 2).

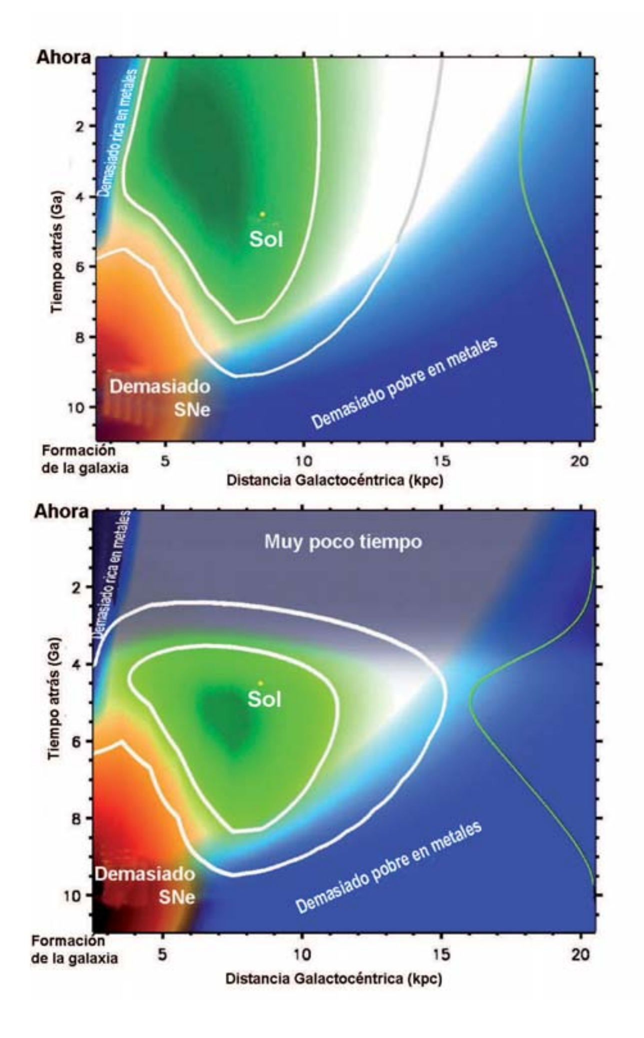


Fig. 2 - La zona habitable galáctica según Lineweaver et al., (2004). Las regiones habitables se encuentran rodeadas por curvas blancas. En la figura de arriba se exige una media de 4.000 millones de años para la aparición de vida compleja, mientras que en la de abajo se elimina dicha restricción (imágenes cortesía del Prof. Lineweaver).

Prantzos (2006) realiza un estudio análogo al de Lineweaver et al. (2004), con algunas modificaciones y obtiene resultados completamente distintos, ya que para él la GHZ ocupa esencialmente toda la Galaxia (Figura 3). En este trabajo, se adopta una probabilidad constante de formar planetas de tipo terrestre basada en simulaciones numéricas: a baja Z los pocos metales existentes no permiten formar planetas gigantes, y acaban formando algunos planetas de tipo terrestre. En particular, se toma $P_{FE} = 0{,}4$ sin dependencia con la metalicidad. Por otra parte utiliza la probabilidad de Fischer y Valenti (2005) para albergar planetas gigantes:

$$P_{HJ} = 0{,}03 \times 10^{2{,}0\left[\frac{Fe}{H}\right]}$$

que da una contribución mucho más reducida que la de Lineweaver (2001). Por lo demás, mantiene la forma de Lineweaver (2001) para P_{HE}, aunque posiblemente sea demasiado restrictiva, así como la probabilidad de que una supernova produzca efectos adversos sobre planetas cercanos de Lineweaver, Fenner y Gibson (2004), asimismo sin dejar de considerar que es también excesivamente restrictivo.

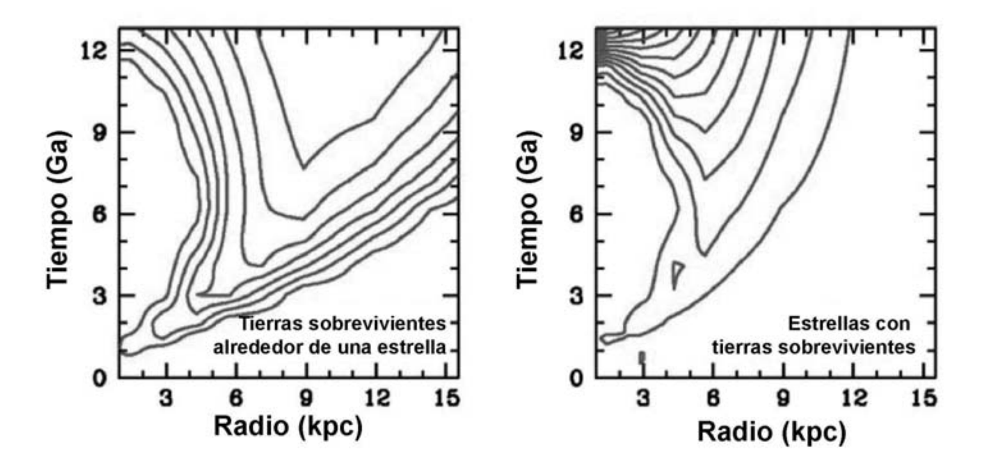


Fig. 3 - La GHZ según Prantzos (2006). A la izquierda se muestra las curvas de probabilidad de supervivencia para planetas de tipo terrestre. A la derecha, se convoluciona esta probabilidad con la densidad total de estrellas en la Galaxia, y por lo tanto se obtiene la densidad de estrellas con planetas habitables por seres vivos complejos (imagen cortesía Prof. Prantzos).

Recientemente, Sundin (2006) ha evaluado el efecto de la barra central en la extensión y complejidad topológica de la GHZ (entendida como la región cercana al círculo de corotación). Sus conclusiones preliminares apuntan a que, puesto que la barra central de las galaxias tiende a crecer hasta el círculo de corotación, cada vez menos estrellas estarán en la zona habitable de la Galaxia. Meneses-Goytia et al. (2010) han realizado un análisis más avanzado e interesante de este mismo problema (basado en un análisis análogo al de Lineweaver et al., 2004), hallando que en realidad la GHZ se extiende a lo largo de la mayor parte de la Galaxia, e incluso hasta regiones muy externas.

9. Ejercicios

- Considere un modelo muy simplificado de Galaxia como un cilindro muy plano (de radio 10 000 pc y altura 100 pc), en el cual todas las estrellas están distribuidas de manera uniforme por su interior. Si, en promedio, cada 100 años estallan dos supernovas en la Galaxia, evalúe el número de ellas que habrán sucedido a 10 pc o menos del Sol en los 4.500 millones de años de su existencia. ¿Cuántos focos malignos habrán producido según Collar (1996)? ¿Cómo podría mejorar este modelo?
- Calcular la razón entre P_{HJ} de Lineweaver (2001; aquí esta probabilidad se denota P_{DE}) con la de Fisher y Valenti (2005). Justifique entonces los resultados de Prantzos (2006) para la extensión de la GHZ. Puede calcular P_{HJ} de Lineweaver (2001) usando los datos de http://exoplanet.eu

Agradecimientos: El autor desea mostrar su agradecimiento al LOC, y en especial a Guillermo A. Lemarchand, por su amable invitación a participar en la escuela y por su excelente trabajo organizativo.

Referencias

Amôres, E. B., Lépine, J. R. D. y Mishurov, Yu. N. The Corotation Gap in the Galactic HI Distribution, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* en prensa, 2009.

Armitage, P. J. A Reduced Efficiency of Terrestrial Planet Formation Following Giant Planet Migration, *Astrophysical Journal,* vol. 582: L47, 2003.

Barbon, R., Buondi, V., Cappellaro, E. y Turatto, M. The Asiago Supernovae Catalog, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series,* vol. 139: 531, 1999.

Basu, S., Stuart, F. M., Schnabel, C., Klemm, V. Galactic Cosmic Ray Produced ^{3}He in Ferromanganese Crust: Any Supernova ^{60}Fe Excess on Earth?, *Physical Review Letters,* vol. 98: 141103, 2007.

Benítez, N., Maiz-Apellániz, J. y Canelles, M. Evidence for Nearby Supernova Explosions, *Physical Review Letters,* vol. 88: 081101, 2002.

Binney, J. y Tremaine, S., 1987 *Galactic Dynamics*, Princeton University Press, 1987.

Boissier, S. y Prantzos, N. Relative Frequencies of Supernova Types: Dependence on Host Galaxy Magnitude, Galactocentric Radius, and Local Metallicity, *Astronomy and Astrophysics,* vol. 503: 137, 2009.

Carslaw, K. Cosmic rays, Clouds, and Climate, *Nature,* vol. 460: 332, 2009.

Collar, J. I. Biological Effects of Stellar Collapse Neutrinos, *Physical Review Letters,* vol. 76: 999, 1996.

Collar, J. I. Collar Replies, *Physical Review Letters,* vol. 78: 1395, 1997.

Cossairt, J. D. y Marshall, E. T. Comment on «Biological effects of stellar collapse neutrinos», *Physical Review Letters,* vol. 78: 1394: 1997.

Dehnen, W. y Binney, J. Mass Models of the Milky Way, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 294: 429, 1998.

Dias, W. S. y Lépine, J. R. D. Direct Determination of the Spiral Pattern Rotation Speed of the Galaxy, *Astrophysical Journal,* vol. 629: 825, 2005.

Ellis, J. y Schramm, D. N. Could a Nearby SN Explosion Have Caused a Mass Extinction?, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 92: 235, 1995.

Farley, K. A. et al. Geochemical Evidence for a Comet Shower in the Late Eocene, *Science,* vol. 280: 1250, 1998.

Fenner, Y. y Gibson, K. Deriving the Metallicity Distribution Function of Galactic Systems, *Publications of the Astronomical Society of Australia,* vol. 20: 189, 2003.

Fernández, D., Figueras, F. y Torra, J. Kinematics of Young Stars. II. Galactic Spiral Structure, *Astronomy and Astrophysics,* vol. 372: 833, 2001.

Ferrari, F. y Szuszkiewicz, E. Cosmic Rays: A Review for Astrobiologists, *Astrobiology,* vol. 9: 413, 2008.

Fields, B. D. y J. Ellis On Deep-Ocean ^{60}Fe as a Fossil of a Near-Earth Supernova, *New Astronomy,* vol. 4: 419, 1999.

Fields, B. D., Athanassiadou, T. y Johnson, S. R. Supernova Collisions with the Heliosphere, *Astrophysical Journal,* vol. 678: 549, 2008.

Fischer, D. A. y Valenti, J. The Planet-Metallicity Correlation, *Astrophysical Journal,* vol. 622: 1102, 2005.

Fitoussi, C. et al. Search for Supernova-Produced ^{60}Fe in Marine Sediments, *Physical Review Letters,* vol. 101: 121101, 2008.

Frogel, J, Gould, A. No Death Star-For Now, *Astrophysical Journal,* vol. 499: L219, 1998.

Fruchter, A. S. et al. Long γ-ray Bursts and Core-Collapse Supernovae Have Different Environments, *Nature,* vol. 441: 463, 2006.

García-Sánchez, J. et al. Stellar Encounters with the Oort Cloud Based on HIPPARCOS Data, *Astronomical Journal,* vol. 117: 1042, 1999.

García-Sanchez, J. et al. Stellar Encounters with the Solar System, *Astronomy and Astrophysics,* vol. 379: 634, 2001.

Gehrels, N. y Chen, W. The Geminga Supernova as a Possible Cause of the Local Interstellar Bubble, *Nature,* vol. 361: 706, 1993.

Gehrels, N. et al. Ozone Depletion from Nearby Supernovae, *Astrophysical Journal,* vol. 585: 1169, 2003.

Gies, D. R. y Helsel, J. W. Ice Age Epochs and the Sun's Path through the Galaxy, *Astrophysical Journal,* vol. 626: 844, 2005.

Hernquist, L. y Springel, V. An Analytical Model for the History of Cosmic Star Formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 341: 1253, 2003.

Hurley, J. R., Pols, O. y Tout, C. A. Comprehensive Analytic Formulae for Stellar Evolution as a Function of Mass and Metalicity, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 315: 543, 2000.

Kirkby, J. Cosmic rays and Climate, *Surveys in Geophysics,* vol. 28: 333, 2008.

Knie et al. Indication for Supernova Produced ^{60}Fe Activity on Earth, *Physical Review Letters,* vol. 83: 18, 1999.

Knie et al. ^{60}Fe Anomaly in a Deep-Sea Manganese Crust and the Implications for a Nearby Supernova Source, *Physical Review Letters,* vol. 93: 171103, 2004.

Leitch, E. M. y Vasisht, G. Mass Extinctions and the Sun's Encounters with Spiral Arms, *New Astronomy,* vol. 3: 51, 1998.

Linewaever, C. H. An Estimate of the Age Distribution of Terrestrial Planets in the Milky Way: Quantifying Metallicity as a Selection Effect, *Icarus,* vol. 151: 307, 2001.

Lineweaver, C. H., Fenner, Y. y Gibson, B. K. The Galactic Habitable Zone and the Age Distribution of Complex Life in the Milky Way, *Science,* vol. 303: 59, 2004.

Maeda, K. et al. Ionospheric Effects of the Cosmic Gamma Ray Burst of 29 March 2003, *Geophysical Research Letters,* vol. 32: L18807, 2005.

Maíz-Apellániz, J. The Origin of the Local Bubble, *Astrophysical Journal,* vol. 560: L83, 2001.

Manucci, F., della Valle, M., y Panagia, N. Two populations of Progenitors for Type Ia supernovae?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 370: 773, 2006.

Marigo, P. et al., *Astronomy and Astrophysics*, vol. 313: 545.

Medvedev, M. V. y Melott, A. L. Do Extragalactic Cosmic Rays Induce Changes in Fossil Diversity?, *Astrophysical Journal,* vol. 664: 879, 2007.

Melott, A. L. Long-Term Cycles in the History of Life: Periodic Biodiversity in the Paleobiology Database, *PLoS ONE,* vol. 3: e4044, 2008.

Meneses-Goytia, S., Carigi, L. y García-Rojas, J. Chemical Evolution and the Galactic Habitable Zone of M31, the Andromeda Galaxy, en preparacion para Astrobiology, 2010.

Nakamura, F. y Umemura, M. On the Initial Mass Function of Population III Stars, *Astrophysical Journal,* vol. 548: 19, 2001.

Overholt, A., Melott, A. y Pohl, M. Testing the Link Between Terrestrial Climate Change and Galactic Spiral Arm Transit, *Astrophysical Journal*, en prensa, 2009.

Prantzos, N. On the Galactic Habitable Zone, *Space Science Reviews,* vol. 135: 313, 2006.

Raymond, S. N., Quinn, T. y Lunine, J. I. Terrestrial Planet Formation in Disks with Varying Surface Density Profiles, *Astrophysical Journal,* vol. 632: 670, 2005.

Raymond, S. N., Quinn, T. y Lunine, J. I. The Formation and Habitability of Terrestrial Planets in the Presence of Close-In Giant Planets, *Icarus*, vol. 177: 256, 2005.

Raymond, S. N., Mandell, A. M., y Sigurdsson, S. Exotic Earths: Forming Habitable Worlds with Giant Planet Migration, *Science,* vol. 313: 1413, 2006.

Raymond, S. N., Scalo, J., Meadows, V. S. A Decreased Probability of Habitable Planet Formation around Low-Mass Stars, *Astrophysical Journal,* vol. 669: 606, 2007.

Ringermacher, H. I. y Mead, L. R. A New Formula Describing the Scaffold Structure of Spiral Galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 397: 164, 2009.

Rohde, R. y Muller, R. Cycles in Fossil Diversity, *Nature,* vol. 434: 208, 2005.

Ruderman, M. A. Possible Consequences of Nearby Supernovae Explosions for Atmospheric Ozone and Terrestrial Life, *Science,* vol. 184: 1079, 1974.

Ruderman, M. A. Chamberlain, Origin of the Sunspot Modulation of Ozone: Its Implications for Stratospheric NO Injection, *Planetary and Space Science,* vol. 23: 247, 1975.

Scalo, J. y Wheeler, J. C. Astrophysical and Astrobiological Implications of GRB Properties, *Astrophysical Journal,* vol. 566: 723, 2002.

Scalo, J., Wheeler, J. C. y Williams, P. Intermittent Jolts of Galactic UV Radiation: Mutagenic Effects en L. Celnikier (Ed.) *Frontiers of Life*, 2001.

Stanek, K. Z., et al. Protecting Life in the Milky Way: Metals Keep the GRBs Away, *Acta Astronomica*, vol. 56: 333, 2006.

Sundin, M. The galactic Habitable Zone in Barred Galaxies, *International_Journal of Astrobiology,* vol. 5: 325, 2006.

Tagle, R. y Claeys, P. Comet or Asteroid Shower in the Late Eocene, *Science,* vol. 305: 492, 2004.

Thielemann, F.–K., Nomoto, K. y Hashimoto, M. Explosive Nucleosynthesis in Supernovae, en Prantzos, Vangioni-Flam, y Cassé, (Eds) *Origin and Evolution of the Elements*, Cambridge, Cambridge University Press, 1993.

Thomas, B. C. *Terrestrial Ozone Depletion due to a Milky Way Gamma Ray_Burst,* Tesis Doctoral, Kansas University, 2005.

van den Hoek, L. B. y Groenewegen, M. A. T. New Theoretical Yields of Intermediate Mass Stars, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, vol. 123: 305-328, 1997

Ward, P. D. y Brownlee, D. *Rare Earth. Why Complex Life is Uncommon in the Universe*, Copernicus Books, 2000.

Woosley, S. y Heger, A. The Progenitor Stars of Gamma-Ray Bursts, *Astrophysical Journal,* vol. 637: 914, 2006.

Woosley, S. y Weaver, T. A. The Evolution and Explosion of Massive Stars. II. Explosive Hydrodynamics and Nucleosynthesis, *Astrophysical Journal Supplement Series,* vol. 101: 181, 1995.

Woosley, S. E., Heger, A. y Weaver, T. A. The Evolution and Explosion of Massive Stars, *Reviews of Modern Physics,* vol. 74: 1015, 2002.

Yasui, C. et al. The Lifetime of Protoplanetary Disks in a Low-Metallicity Environment, *Astrophysical Journal*, en prensa, 2009.

Capítulo 4

Estrellas astrobiológicamente interesantes: criterios modernos para la habitabilidad

Gustavo F. Porto de Mello

Resumen La existencia de vida basada en la química de carbono y océanos de agua líquida depende esencialmente de propiedades planetarias como masa, distancia a la estrella huésped, composición química, presencia de campos magnéticos, estabilidad climática, características atmosféricas y estabilidad contra catástrofes de tipo planetario. Otros factores fundamentales que influyen en la existencia de vida son las propiedades estelares, como masa, edad, metalicidad, estado de actividad de alta energía y la órbita galáctica. Las principales propiedades estelares consideradas como más favorables para la evolución y mantenimiento de vida a largo plazo pueden ser bien restringidas con el conocimiento actual.

El factor más importante que gobierna la habitabilidad planetaria, se piensa, es la presencia de agua líquida en la superficie planetaria, estabilizada en escalas de miles de millones de años por el cambio de gases de efecto invernadero entre la corteza y el océano, bajo procesos de intemperismo y actividad geológica (tectónica de placas).

Discutimos de manera comprehensiva las restricciones actuales y el estado del arte para la selección de estrellas astrobiológicamente interesantes entre las estrellas del disco Galáctico. Ponemos un énfasis particular en las estrellas de tipo solar favorables a la presencia por largas escalas de tiempo de planetas terrestres en la zona de habitabilidad continua canónica. Estos planetas serán sobre todo los candidatos propuestos de las futuras misiones espaciales dedicadas a la detección remota de vida fotosintética por la presencia de atmósferas de composición fuera de equilibrio, detectable por biomarcadores en el infrarrojo térmico.

La masa y composición química estelares fijan la probabilidad de formación planetaria y la escala de tiempo de oxigenación de la atmósfera. Esta última, se cree, es un ingrediente crítico para la evolución de vida compleja. La masa estelar también influye, probablemente, en la posición orbital de los planetas y por lo tanto la ubicación de la zona de habitabilidad.

Gustavo F. Porto de Mello (✉)
Observatório do Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ladeira do Pedro Antonio, 43, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 20080-090, Brasil
gustavo@astro.ufrj.br

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 77 - 106, © 2010 UNESCO-Montevideo.

La multiplicidad estelar es otro factor importante que fija la probabilidad de formación planetaria y su estabilidad orbital, e influye en la estabilidad climática a largo plazo por la presencia de perturbaciones gravitacionales de la estrella compañera. Se ha reconocido últimamente que el nivel estelar de actividad cromosférica tiene un impacto apreciable en el tiempo de vida de biósferas, ya que estrellas de pequeña masa poseen una fase prolongada de emisiones de alta energía que pueden amenazar la presencia o retrasar el establecimiento de la habitabilidad planetaria. La composición química estelar, además, probablemente determina en algún grado la composición química planetaria, que va a afectar algunas propiedades planetarias cruciales tales como la actividad geológica, la razón manto-núcleo, la acción de placas tectónicas y la presencia de campos magnéticos.
Por último, la órbita galáctica estelar puede, aunque todavía especulativamente, influir en la habitabilidad a largo plazo, exponiendo biósferas a la proximidad de brazos espirales y nubes moleculares gigantes, objetos masivos capaces de perturbar la nube cometaria de Oort y disparar episodios de extinción en masa por impactos, así como el bombardeo radiativo violento por supernovas de tipo-II. Se demuestra que, bajo tales restricciones, aproximadamente el 7% de las estrellas de la población Galáctica del disco pueden ser consideradas óptimas candidatas para la astrobiología.

Abstract The existence of life based on carbon chemistry and water oceans relies chiefly upon planetary properties, such as mass, distance from host star, chemical composition, presence of magnetic fields, climate stability, atmospheric characteristics and stability against global catastrophes. Other major factors influencing the existence of life are the stellar properties, such as mass, age, metallicity, high-energy activity state and the galactic orbit. The main stellar properties thought to be more conducive to the evolution and long term maintenance of life can be well constrained with present knowledge. The main factor governing planetary habitability is thought to be the presence of liquid water on the surface, stabilized over billions of years by crust-ocean exchanges of greenhouse gases through weathering processes and geologic activity (plate tectonics). We discuss in a comprehensive way up-to-date, state-of-the-art criteria for the selection of astrobiologically interesting stars in the Galactic disk population. Special emphasis is placed on solar-type stars conducive to the long term presence of terrestrial planets inside the canonical continuously habitable zone. Such planets are the proposed main targets of the planned space missions aimed at remotely detecting photosynthetic life by the presence of a non-equilibrium atmospheric composition, detectable by biosignatures in the thermal infrared. The stellar mass and chemical composition fix the probability of planetary formation and the timescale for the oxygenation of the atmosphere, the latter thought to be a critical ingredient for the evolution of complex life. The stellar mass is also, probably, influential on the orbital position of planets and therefore their placement inside the habitable

zone. Multiplicity is another important factor governing the probability of planetary formation and their orbital stability, as well as influencing the long term stability of climate by the presence of gravitational perturbations of the companion star. The stellar degree of chromospheric activity has been also lately recognized as having an important impact on the lifetime of biospheres, since low mass stars possess a prolonged phase of enhanced high energy emissions which may threaten, or at least delay the onset of habitability of planets. Moreover, the stellar chemical composition, probably determines to some degree the planetary chemical composition, which will affect many crucial planetary properties such as geologic activity, the mantle-core mass ratio, the action of plate tectonics and the presence of a magnetic field. Lastly, the stellar galactic orbit may, although still speculatively, influence long term habitability by exposing biospheres to the proximity of spiral arms and giant molecular clouds, massive objects capable of disrupting the Oort cloud and triggering episodes of mass extinction by impacts, as well as violent radiative bombardment by type-II supernovae. We show that approximately 7% of the stellar population of the galactic disk may be considered optimal targets for astrobiology, in the light of these criteria.

1. Introdución: el concepto de habitabilidad

La existencia y mantenimiento de la vida compleja, tal como la conocemos en el planeta Tierra, está basada en un grupo de propiedades razonablemente bien establecidas por el estado del arte de la Ciencia. Entre las más esenciales, se encuentra una estrella de larga vida, de tipo solar, dentro de restricciones definidas de masa y luminosidad y también, probablemente, de contenido metálico (con abundancia de elementos químicos más pesados que el helio). Otra propiedad considerada esencial es contar con un planeta rocoso, también denominado terrestre, con gran calor interno, y capaz de sostener agua líquida en su superficie por escalas de tiempo de miles de millones de años. Dicho planeta también debe ser capaz de sostener una actividad tectónica por períodos geológicamente importantes, en una escala de miles de millones de años, así como mantener la acción estable de un campo magnético, que proteja la superficie planetaria de partículas energéticas biológicamente dañinas. Otras propiedades fundamentales son una atmósfera de composición CO_2–H_2O–N_2, operando un ciclo carbonato-silicato de estabilización climática tras la tectónica de placas, acoplado a la actividad volcánica (Kasting, 1996; Franck et

al., 1999, 2000a,b; Kasting and Catling, 2003). Por último, son necesarios los ingredientes fundamentales de la química de cadenas de carbono, océanos de agua líquida y la estabilidad de largo plazo. La exigencia de estos atributos tiene origen en nuestro conocimiento inmediato de la evolución de la vida en la Tierra, pero sin embargo deben orientar la búsqueda de vida en otras partes, aunque no más que como un punto de partida para la discusión cuantitativa.

Una motivación inmediata para la discusión de estas restricciones planetarias y estelares es el hecho de que ciertas misiones espaciales se encuentran actualmente en la fase de planificación y que podrán, en los próximos 15 o 20 años, ser capaces de detectar la presencia de planetas terrestres en la zona de habitabilidad de estrellas cercanas al Sol. Es teóricamente posible, desde el espacio, anular interferometricamente la radiación de las estrellas en el infrarrojo térmico, entre 1 y 10 micrones, revelando así la presencia de planetas que normalmente estarían abrumados en la luz estelar. Ejemplos de posibles sondas direccionadas a estos resultados son el Terrestrial Planet Finder de la NASA (Lawson et al. 2004) y la misión Darwin de la ESA (http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/).

El infrarrojo térmico ofrece la posibilidad de explorar mejor el contraste existente entre planeta y estrella. La espectroscopía de estos planetas podrá revelar potencialmente la presencia de absorciones atmosféricas características de la presencia de océanos extensos de agua y de vida fotosintética, principalmente tras la detección de vapor de agua, metano y ozono. La selección de estrellas candidatas para estos proyectos deberá estar basada en nuestro conocimiento actual de las condiciones atmosféricas óptimas para la evolución de la vida en planetas terrestres hasta el punto en que la atmósfera esté masivamente modificada por la acción bioquímica de la biosfera –punto en que la propia biosfera de la Tierra ha estado desde aproximadamente los últimos 2000 millones de años (Segura et al. 2003).

En la aurora de la ciencia siglo XXI, en la cual la astronomía figura de manera muy expresiva, la continuidad de la investigación de los exoplanetas, y la planificada exploración remota de planetas de tipo terrestre seguramente se presentarán como tópicos de destaque en la agenda científica de las décadas siguientes (Tarter 2001). El desarrollo de la tecnología de la interferometría espacial representa, en el momento, el método más accesible, y tecnológicamente más prometedor, de establecer de manera definitiva la presencia de vida fuera del ámbito de la Tierra. De hecho, no es una fantasía excesiva de la imaginación pensar que, a lo mejor, será más fácil y práctico en el futuro más inmediato detectar biósferas exoplanetarias que hayan sufrido la acción bio-

química prolongada de una biósfera, que, por ejemplo, una misión, tripulada o no, a Marte o Europa para la exploración in situ de una biosfera mantenida por microorganismos, pero incapaz de alterar el medio ambiente a punto de afectar la evolución termodinámica del planeta o satélite huésped.

La estabilidad a largo plazo es mucho más difícil de definir. Hay evidencias seguras de que la vida terrestre ha sido sometida a extinciones en masa de gran escala, que en un par de veces han puesto en jaque la propia existencia de vida compleja, aunque sea muy probable que la vida microbiana no haya sido amenazada de manera significativa en la historia terrestre. Ejemplos bien estudiados son la extinción de la transición entre el Cretáceo y el Terciario, hace 65 millones de años, para la cual existe fuerte evidencia de que un impacto cometario sea el culpable (Alvarez et al. 1980). En el caso de un impacto de cuerpos más grandes que 10 km, aproximadamente, la cantidad de energía súbitamente inyectada en el conjunto hidrósfera-atmósfera es suficiente para llevar a una catástrofe de carácter global. La consecuencia más inmediata es la transferencia hacia la alta atmósfera de gran cantidad de polvo, que tiene un efecto drástico sobre la llegada de la luz solar a la superficie. Por un intervalo de muchos meses o años la fotosíntesis se hace imposible o marginal, causando la muerte de plantas que a su vez lleva a la disrupción de toda la cadena alimenticia.

La más extensiva de todas las extinciones, en lo que se refiere al impacto global sobre la biósfera, ha sido la de la transición entre el Pérmico y el Triásico, en la cual el 96% de las especies desaparecieron. Ésta fue posiblemente disparada por erupciones volcánicas masivas, con concurrentes flujos de lava que impulsaron la concentración de gases de efecto invernadero a niveles muy altos, calentando la Tierra globalmente, causando estragos inmensos en el clima, y bajando la concentración de oxígeno a niveles casi anóxicos (Benton & Twichet 2003). Por otro lado, hay sugerencias de que la extinción del Pérmico-Triásico también ha sido causada por un impacto extraterrestre (Becker et al. 2004), y sin embargo los dos eventos pueden haber co-existido (Courtillot 2002). La controversia sobre la importancia de causas endógenas o exógenas en eventos de extinción en masa sigue siendo un tema de debate entre astrofísicos, paleontólogos y científicos planetarios, y hasta ha sido sugerido que súper erupciones pueden ser una restricción más aguda para la supervivencia a largo plazo de biósferas y civilizaciones que los impactos, ya que su intervalo de ocurrencia puede ser más corto que el de los impactos medianos (Rampino 2002). De todas maneras, hay abundante evidencia de catástrofes pasadas con duro impacto sobre la biósfera, y sin embargo la vida terrestre puede sobre-

vivir, y ha de hecho sobrevivido, a estos eventos. Una manera de definir la estabilidad a largo plazo es tomar la evidencia terrestre como representativa y considerar que una biosfera debe ser capaz de soportar daños recurrentes de esta naturaleza por un tiempo del orden de magnitud de la edad de Tierra.

2. Habitabilidad: restricciones generales

Todo el tema de la habitabilidad está basado en un ambiente radiativo favorable para el mantenimiento de agua líquida en superficies planetarias. Podemos considerar esta restricción como la número uno, y ella corresponde casi exclusivamente a propiedades estelares. La restricción número dos sería planetaria y corresponde a la capacidad del planeta de, sometido a un ambiente radiativo favorable, efectivamente ser capaz de mantener océanos de agua líquida por sus propias propiedades de masa, composición química y distancia orbital.

Estrellas adecuadas, por tanto, ponen a disposición a su alrededor la llamada zona de habitabilidad continua, en la cual un planeta, también adecuado, podrá mantener la presencia de agua líquida por períodos de tiempo compatibles con el desarrollo de vida compleja. La interacción de la radiación estelar y la estabilidad climática parece estar fundamentalmente conectada a un ciclo geológico homeostático llamado carbonato-silicato, tras un mecanismo de retroalimentación (feedback) en el cual la concentración atmosférica del gas más importante del efecto invernadero, el dióxido de carbono (CO_2), varía inversamente con la temperatura superficial planetaria (Kasting et al., 1993, Franck et al., 2000a, b). Estos gases, esencialmente el CO_2, el metano y el vapor de agua, tienen la propiedad de ser casi transparentes al pasaje de radiación en el visible, pero bloquean con eficiencia el retorno de radiación en el infrarrojo, producto de la termalización de la radiación solar después de su interacción con la superficie planetaria.

Este proceso implica una reacción de la concentración de dióxido de carbono a la radiación estelar entrante, primero provocando un intemperismo más acentuado, el cual a su vez secuestra una fracción más grande de dióxido de carbono hacia afuera de la atmósfera. En este sentido, simplificadamente, la concentración de CO_2 disminuye en la proporción exacta para oponerse al aumento del flujo radiativo. Los aspectos esenciales del proceso no son, todavía, íntegramente conocidos, pero se pueden describir así: una concentración inicial de CO_2 en la atmósfera es responsable por una temperatura planetaria

superficial. La actividad volcánica, episódicamente, inyecta más CO_2, lo que tiene como efecto aumentar la temperatura superficial. Ésto, por consecuencia, hace más intenso el intemperismo, principalmente la erosión de rocas, por acción directa de la temperatura o por un aumento de la pluviosidad. Esto expone a la atmósfera material rocoso virgen (silicatos), que interactúa con la concentración más grande de dióxido de carbono tras reacciones de oxidación, en las cuales el CO_2 es removido de la atmósfera combinándose en sedimentos de minerales carbonados (en una primera aproximación, este proceso es una conversión de $CaSiO_3$ en $CaCO_3$, de donde viene el nombre del ciclo) que son transportados para los océanos. Una vez allí, los nuevos sedimentos serán depositados en el lecho oceánico, hasta que, en algún momento, el movimiento de las placas tectónicas transporta el material sedimentario hacia una zona de subducción, donde será disuelto en el magma del manto terrestre. Los minerales que contienen carbono son disueltos, y el gas es una vez más libre para, a través de los volcanes, regresar a la atmósfera, cerrando el ciclo.

Así, flujos radiativos más intensos desplazan el equilibrio de temperatura hacia valores más altos, lo que naturalmente tiene efecto sobre la remoción de dióxido de carbono de la atmósfera, disminuyendo la temperatura. Por otro lado, si la actividad volcánica disminuye, y la reposición de dióxido en la atmósfera decrece, esto disminuye la temperatura y hace que disminuya también el intemperismo, y así la concentración de dióxido de carbono podrá volver a crecer cuando reanude la actividad volcánica.

Un aspecto esencial de la teoría es que un planeta, para ser habitable a largo plazo, necesita un calor interno suficientemente grande para sostener actividad volcánica por miles de millones de años. Por consiguiente, las tres variables, –el aporte radiativo, la temperatura superficial y la concentración de CO_2– tienden a mantener un estado de equilibrio. Esta homeostasis depende de la composición de la atmósfera y de la manutención de procesos de intemperismo por la tectónica de placas.

Existen algunos efectos desestabilizadores que trabajan contra el ciclo carbonato-silicato, obstaculizando su perfecta actuación. En la atmósfera, juntamente con el dióxido de carbono, que tiene una concentración constante en cortos períodos de tiempo, el vapor de agua es también un gas de efecto invernadero, pero con una concentración altamente variable. Un aumento de temperatura tiene como efecto un aumento de evaporación de agua de los océanos, lo que hace aumentar la concentración de vapor de agua en la atmósfera, promoviendo la formación de nubes. Las nubes de vapor de agua generalmente actúan en la dirección de aumentar el efecto invernadero, lo que

introduce un bucle de retroalimentación positiva, de manera que un aumento de temperatura que sería compensado por la remoción de dióxido de carbono de la atmósfera es desequilibrado por un exceso de vapor de agua en la atmosfera, lo que de hecho constituye en uno de los limites de habitabilidad que vamos discutir más adelante. Por otro lado, hay un efecto secundario de la presencia de nubes de vapor de agua, que es aumentar el albedo planetario, lo que disminuye la absorción directa de radiación y por consecuencia la temperatura de equilibrio.

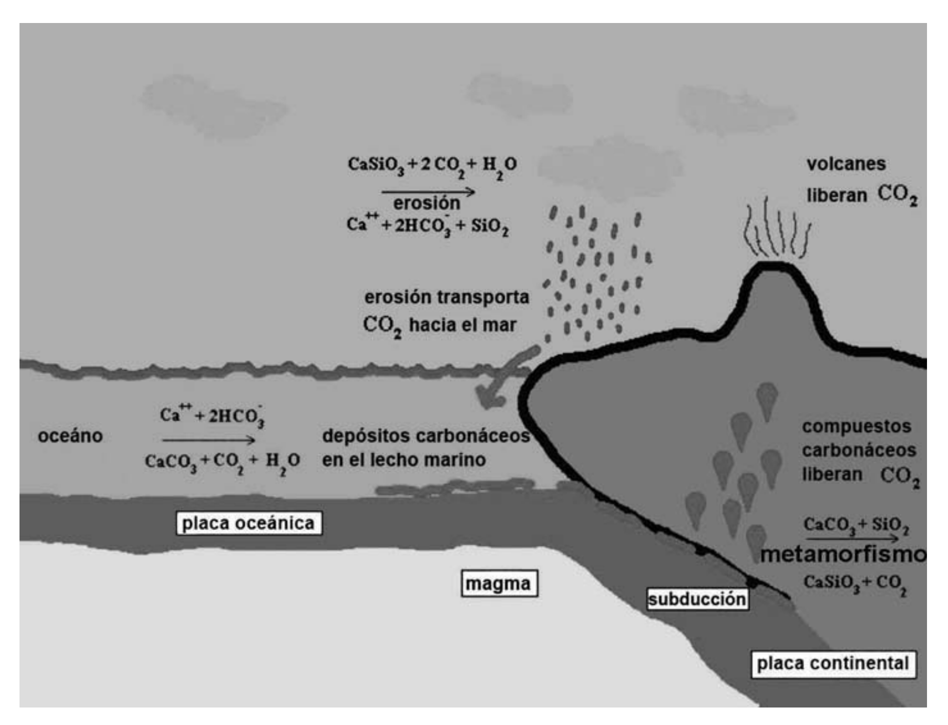


Fig. 1 – Ilustración del mecanismo del ciclo carbonato-silicato de actuación para el mantenimiento de la temperatura superficial de la Tierra dentro de los límites de existencia de agua líquida

El otro efecto desestabilizador importante proviene de la propiedad del CO_2 de, sometido a una temperatura muy baja, formar nubes en altitud. Dichas nubes son extremadamente reflectoras de radiación. Por lo tanto, existe un punto límite en el equilibrio del efecto invernadero en el cual una temperatura excesivamente baja resulta en un aumento de las concentraciones de dióxido de carbono que lleva a la formación de nubes reflectoras, las cuales impiden el aporte radiativo, enfriando el planeta. La consecuente disminución de la temperatura impulsa la formación de aún más nubes de CO_2, lo que pone al

planeta en una situación de glaciación ilimitada, reduciendo la temperatura a un punto en el cual el planeta es incapaz de sostener la presencia de agua líquida.

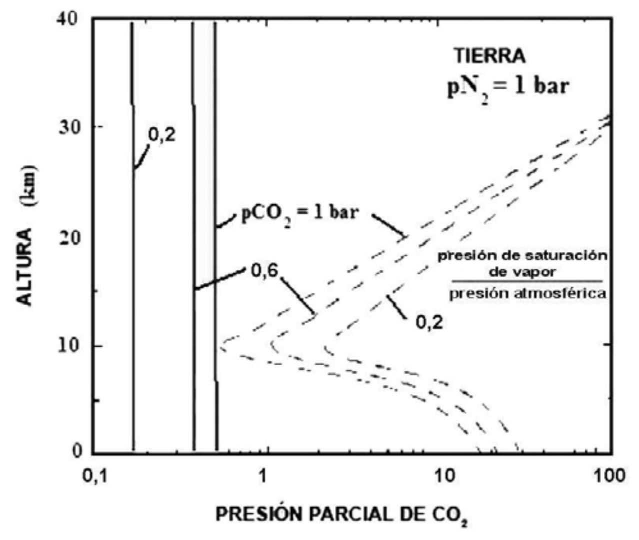


Fig. 2 – El límite físico de la zona de habitabilidad fijado por la primera formación de nubes de CO_2. En las abscisas, la presión parcial de CO_2 en la atmósfera, en las ordenadas, la altitud. El aumento de la concentración de CO_2 provoca la condensación a una presión de un bar, cuando la presión atmosférica equivale a la presión de saturación.

Podemos resumir así la teoría esencial de la estabilidad climática: el límite interno de habitabilidad está fijado por un desequilibrio entre el aumento de temperatura y la presencia de vapor de agua en la atmósfera. Este límite queda violado si la concentración de vapor de agua sobrepasa un punto en el cual la estratosfera, normalmente muy seca, se hace húmeda. Las moléculas de agua en la estratosfera son fácilmente disociadas por la radiación ultravioleta del Sol y el hidrógeno es perdido hacia el espacio. Este proceso implica la pérdida de los océanos en una escala de tiempo de algunos centenares de millones de años. El límite externo está fijado por la formación de nubes de dióxido de carbono que enfrían el planeta por la disminución de su albedo, lo que tiene como consecuencia la promoción de más nubes en un bucle de retroalimentación positiva que congela la superficie.

Modelos radiativos de la atmósfera, aunque sometidos a una serie de simplificaciones, son capaces de estimar las distancias límite de la zona de habitabilidad, como una función de la luminosidad estelar y la composición

atmosférica del planeta (Kasting et al., 1993; Franck et al., 2000a,b). Las incertidumbres son distintas entre los casos de los límites internos y externos. Los puntos de partida de los modelos son planetas de dimensiones no muy distintas a los de la Tierra, con una atmósfera de H_2O-N_2-CO_2 y una presión barométrica alrededor de un bar (una atmósfera). Variando el aporte radiativo sobre el planeta, lo que equivale a una variación de distancia, es matemáticamente posible hacer predicciones sobre el mantenimiento de agua líquida en la superficie, condicionado a una temperatura entre 0°C y 100°C.

Para el caso interno, los modelos consideran el punto de temperatura en el cual la saturación de vapor de agua en la tropósfera ya no puede ser contenida en la tropopausa. La consecuencia de ésto es la presencia de agua en la estratósfera y la pérdida de hidrógeno hacia el espacio, tras el rompimiento de moléculas de agua por la acción ultravioleta del Sol. Este límite de flujo radiativo corresponde a 10% más que la presente luminosidad solar, o $S_{eff} \sim 1,10$, donde S_{eff} es definido como el equivalente luminoso del Sol actual. En términos de distancia, $S_{eff} \sim 1,10$ equivale a 0,95 UA, un poco más cerca del Sol actual que la distancia de la Tierra. Este límite, que llamaremos de estratósfera húmeda, es probablemente excesivamente pesimista, ya que no considera los efectos moderadores de las nubes de vapor de agua.

Por otro lado, el planeta Venus casi seguramente nunca ha estado dentro de la zona de habitabilidad, ya que todas las evidencias sugieren que el mismo ha sido formado húmedo, y ha perdido gran parte de su contenido de agua por estar fuera del límite operativo del efecto invernadero estable. El Sol de edad cero era ~70% menos luminoso que el actual, y por el criterio de $S_{eff} = 1,10$, esta distancia equivalía, en la época, a 0,79 UA, un poco más que la distancia de Venus al Sol, que es de 0,70 UA. Por lo tanto, según este análisis, Venus nunca ha estado dentro de la zona de habitabilidad. Los modelos predicen que para un flujo $S_{eff} \sim 1,40$ los océanos se evaporan completamente, y esta distancia corresponde a 0,84 UA para la luminosidad presente del Sol. El mismo valor para el Sol de edad cero es 0,70 UA, lo que confirma, para un caso más optimista, que Venus, a lo mejor, estaba en el borde de la zona interna de habitabilidad y ha perdido sus océanos por la imposibilidad de operar un ciclo carbonato-silicato estable.

El límite externo para la habitabilidad es fijado por los mismos modelos, calculándose el punto donde un aumento de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera ya no tiene consecuencia sobre la actuación del efecto invernadero, una vez que la atmósfera ya se hizo completamente opaca a la radiación infrarroja reemitida por la superficie planetaria hacia el espacio.

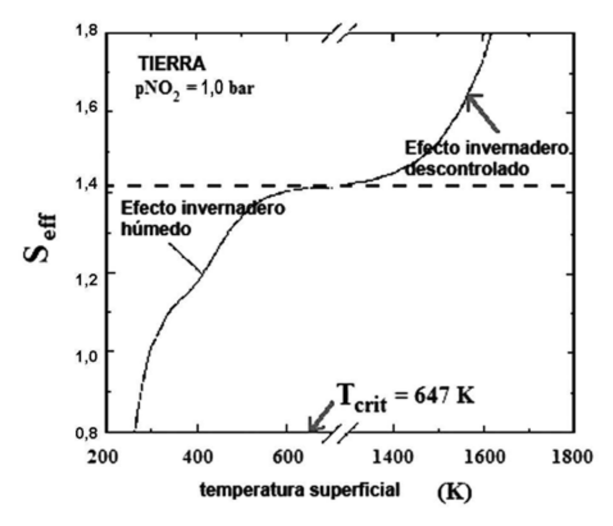


Fig. 3 – Los límites físicos internos de la zona de habitabilidad, el efecto invernadero húmedo, y el efecto invernadero descontrolado. En el primero se obtiene S_{eff} = 1,10, y en el segundo S_{eff} = 1,41.

Este punto corresponde al llamado efecto invernadero máximo, y vale para un equivalente radiativo de S_{eff} = 0,36, y a una distancia de 1,67 UA para el Sol actual. En este límite optimista, Marte, a una distancia de 1,52 UA del Sol, se encuentra actualmente dentro de la zona de habitabilidad. Pero, para el Sol de edad cero, el límite de distancia sería de 1,40 UA, y Marte estaría un poco fuera de la zona de habitabilidad en la etapa de formación del Sistema Solar. Éste es un límite probablemente optimista ya que ignora el efecto de la formación de nubes de dióxido de carbono, que reflejan radiación solar directamente de vuelta hacia el espacio en alturas elevadas, contribuyendo al enfriamiento. Por otro lado, hay evidencia de que Marte tuvo cantidades apreciables de agua líquida en el pasado, lo que es un argumento a favor de esta visión optimista de que Marte haya estado dentro de la zona de habitabilidad hasta hace ~3000 millones de años. Imponer un Marte "húmedo" en el pasado resulta en un valor límite un poco más moderado, de S_{eff} = 0,32.

Otro límite interesante se obtendría al considerar a qué flujo radiativo ocurre la primera condensación de nubes de dióxido de carbono, y los modelos sugieren que este valor sería alrededor de S_{eff} = 0,53, una distancia de 1,37 UA para el Sol actual, y de 1,15 UA para el Sol de edad cero, poniendo a Marte fuera de la zona de habitabilidad desde el principio de la evolución

solar. Este valor, a su vez, es probablemente pesimista ya que ignora el hecho de que la formación de nubes de dióxido de carbono tiene no solamente el efecto de aumentar el albedo planetario y disminuir la temperatura superficial, sino también de reflejar parte de la radiación infrarroja de vuelta hacia la superficie y calentar así el planeta. Sin embargo, Kasting et al. (1993) sugieren que la formación de nubes de dióxido de carbono en las partes más frías de la atmósfera, alrededor de los polos, podría tener efectos importantes sobre el clima mucho antes que la cobertura de nubes se hiciese global. El límite más fiable se encuentra probablemente entre estos dos casos.

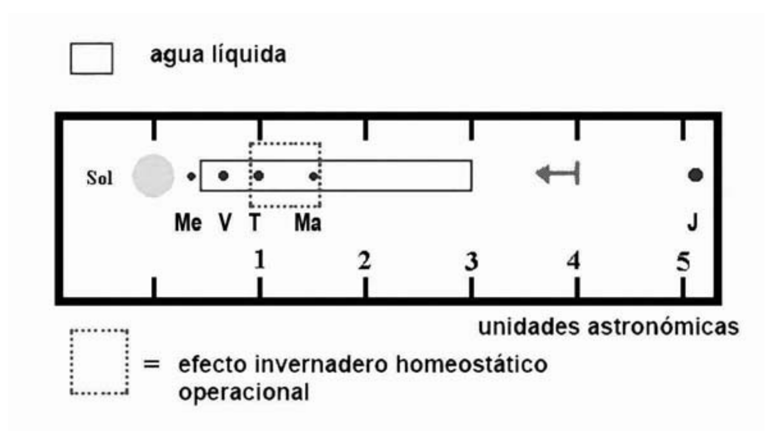


Fig. 4 – Límites de la zona de habitabilidad en el Sistema Solar, El cuadro con línea contínua simplemente muestra los límites donde el agua líquida podría existir por simples efectos de temperatura. El cuadro punteado muestra los límites actuales de la zona de habitabilidad, por la restricción "pesimista" del texto.

Pero hay sugerencias de que el límite externo puede estar considerablemente más lejos de la estrella huésped, a un valor de flujo de $S_{eff} \sim 0,2$, lo que corresponde, para el Sol actual, a una distancia tan grande como 2,4 UA, y de 2,0 UA para el Sol de edad cero. Este valor depende considerablemente de los detalles teóricos de la formación de nubes de dióxido de carbono (Forget & Pierrehumbert 1997, Mischna et al. 2000), y puede ser considerado un límite externo máximo optimista para la zona de habitabilidad. Dichos límites son interesantes porque subrayan el hecho de que la incapacidad de Marte de haber mantenido su habitabilidad está más conectada con propiedades intrínsecas del planeta, en este caso su pequeña masa, que con su posición dentro de la zona de habitabilidad.

Un aspecto teórico importante de los cálculos de habitabilidad es la posibilidad de hacer un planeta habitable de "partida frío", como se dice coloquialmente. La idea sería que, aunque un planeta estuviera inicialmente fuera del

límite externo de la zona de habitabilidad, e inicialmente congelado y sin agua líquida en su superficie, con el aumento de la luminosidad estelar sería posible que el planeta en algún momento lograse ingresar en la zona y, con el aumento de temperatura, se hiciera posible la presencia de agua líquida superficial, empezando así una era tardía de habitabilidad. Los modelos (Kasting et al. 1993) sugieren que esto no sería posible, ya que la posición inicial del planeta fuera de la zona de habitabilidad cubriría la atmósfera con nubes de CO_2, muy reflectoras, y el planeta desarrollaría una superficie helada y muy reflectora. En este caso los cálculos sugieren que un aumento de flujo radiativo ingresante sería devuelto al espacio y el planeta no lograría "descongelarse".

Utilizando nuestro Sistema Solar como ejemplo, podemos estimar el ancho de la zona de habitabilidad continua entre los casos descritos –uno optimista y otro pesimista– considerando para cada uno de ellos un par de valores de distancia, interno y externo. Para el caso optimista, tomamos como límites los flujos radiativos de pérdida total de océanos y de efecto invernadero máximo, respectivamente, para los límites interior y exterior. El Sol de edad cero tenía una luminosidad de ~70% del Sol actual, y siendo los límites numéricos respectivos de S_{eff} = 1,41 y 0,36, las distancias de los límites interno y externo serían de 0,70 y 1,40 UA para la edad solar cero. Los límites presentes serían 0,84 y 1,67 UA, y, aceptando la imposibilidad de poner un planeta de "partida frío", vemos que la zona de habitabilidad se redujo 0,14 UA en los últimos 4.600 millones de años. En este caso, vemos que Venus estaba en el límite interior de la zona de habitabilidad inicial, y no tuvo la posibilidad de mantenerse habitable, en cuanto que Marte, a una distancia de 1,52 UA del Sol, estaba un poco más afuera del límite exterior, en la formación del Sistema Solar. Algunos autores rescatan la posibilidad de un Marte húmedo en el pasado, lanzando la hipótesis de que gases adicionales de efecto invernadero pueden haber calentado Marte hasta un punto superior al de los impuestos por los modelos aquí descritos.

En el caso pesimista se toman los valores de flujos radiativos para la estratósfera húmeda y para la primera condensación de nubes de dióxido de carbono de S_{eff} = 1,10 y 0,53 respectivamente y se llega a valores de distancia de 0,80 y 1,15 UA para los límites interno y externo para el Sol de edad cero, y un límite interno actual de 0,95 UA. Por esta razón, la Tierra estaría muy cerca de desplazarse hacia afuera de la zona de habitabilidad y empezar un proceso de pérdida de océanos, en principio lentamente. Bajo esta interpretación, ni Marte ni Venus han estado jamás en el interior de la zona de habitabilidad.

Está claro que estos límites, desde el punto de vista puramente estelar, están restringidos no solamente por la masa y la luminosidad inicial de la estrella huésped del sistema planetario, sino que también por el tiempo de evolución de las estrellas, ya que la zona de habitabilidad es una zona geométrica dinámica que se desplaza hacia la parte externa del sistema con el aumento inevitable de la radiación estelar tras su evolución.

3. Zonas de habitabilidad planetarias

La zona de habitabilidad continua puede ser definida como la zona delimitada por el rango de distancias desde la estrella huésped, en un sistema planetario, en las cuales la presencia de agua líquida en la superficie planetaria está asegurada por un tiempo mínimo de algunos miles de millones de años –lo que se supone necesario para la evolución de la vida compleja y la modificación masiva de la composición y el equilibrio termodinámico de la atmósfera por la acción de la vida misma.

Esta zona se encuentra supuestamente alrededor de estrellas de clase espectral F frías hasta la estrellas de clase K medianas (Huang, 1959; Kasting et al., 1993; Franck et al., 2000a,b). El motivo principal de ésto es el tiempo de vida de la estrella, que es fuertemente dependiente de su masa. Estrellas de clase F más calientes y de gran masa evolucionan completamente en menos de 3000 millones de años, para una masa 50% mayor que la masa del Sol (Kim et al. 2002, Yi et al. 2003). Si tuviéramos una estrella como ésta en lugar del Sol, la vida estaría extinta por la inhabitabilidad de la Tierra para una edad de la biosfera de 2800 millones de años, una época en la historia de la vida en la Tierra en que la atmósfera no estaba completamente oxigenada, y la vida compleja todavía no había aparecido. Estrellas de clase F, así, poseen zonas de habitabilidad más anchas que la solar, pero éstas evolucionan con gran velocidad mientras la estrella cambia su luminosidad hacia el estado de subgigante. Un tiempo crítico considerado para la evolución de una biosfera compleja ha sido sugerido por Catling et al. (2005), según los cuales una presión parcial de oxígeno mínima de 1000 o 10000 Pa es necesaria para permitir la acumulación relevante de biomasa, y este tiempo de oxigenación es de ~4000 millones de años (Blair-Hegdes et al. 2004), comparable a los propios tiempos de evolución estelar. Esta restricción impone el límite superior de masa de las estrellas

habitables en la zona de las estrellas F menos masivas, ya que sus compañeras más masivas evolucionan en un tiempo suficientemente rápido para implicar un tiempo de oxigenación superior al tiempo de vida de la biósfera, aunque suministren condiciones favorables por algunos miles de millones de años. Si imponemos el límite de oxigenación y vida compleja para definir planetas habitables detectables, el límite superior de masa estelar estaría alrededor de 1,2 o 1,3 masas solares.

Por otro lado, planetas alrededor de estrellas de menor masa, de clase espectral K o M, disponen de una zona de habitabilidad de muy larga duración. Una estrella K de 0,7 masas solares vive casi 29.000 millones de años en la secuencia principal, fase de vida estable donde las estrellas queman hidrógeno en su núcleo de manera casi estática. Dichas estrellas no ofrecen problemas de corta duración de la biósfera, pero su baja luminosidad impone otro límite también crítico. La zona de habitabilidad debe estar necesariamente muy cerca de la estrella, para compensar su baja luminosidad. Una estrella de 0,7 masas solares tiene no más que 25% de la luminosidad solar, lo que resulta en una zona de habitabilidad con la mitad de la distancia a la estrella, y también más angosta. Este hecho tiene como consecuencia que los efectos de marea gravitacionales sean mucho más fuertes en estas estrellas que en el caso del Sol, con su zona de habitabilidad más grande. Estas fuerzas de marea tienen como efecto el frenado de la rotación planetaria en escalas de tiempo cortas (Dole 1964), ya que el efecto de marea depende de la tercera potencia de la distancia. Planetas alrededor de estrellas de masa inferior a 0,7 masas solares, aproximadamente, tienen el efecto de marea tan fuerte que la rotación del planeta se hace igual al período de revolución del planeta alrededor de la estrella en 3000 millones de años, un tiempo comparable al tiempo de oxigenación de la atmósfera.

Un planeta de rotación comparable al período de revolución, de decenas de días o más, sometería el hemisferio iluminado por la estrella a una temperatura extremamente alta, mientras que el otro hemisferio estaría permanentemente helado. Hay un factor que posiblemente pueda mitigar estos problemas. Se trata de un factor dinámico, y consiste en que el planeta no necesitaría estar con un hemisferio enfrentado a la estrella, sino que podría hallarse en una llamada resonancia, en la cual el período de rotación correspondería a una fracción del período de revolución. Un ejemplo de esto es Mercurio, que gira tres veces alrededor de su eje mientras gira dos veces alrededor del Sol. Aunque consideremos esta posibilidad, este efecto impediría la reducción del período de rotación por un factor de no más de dos o menos, lo que sería insuficiente

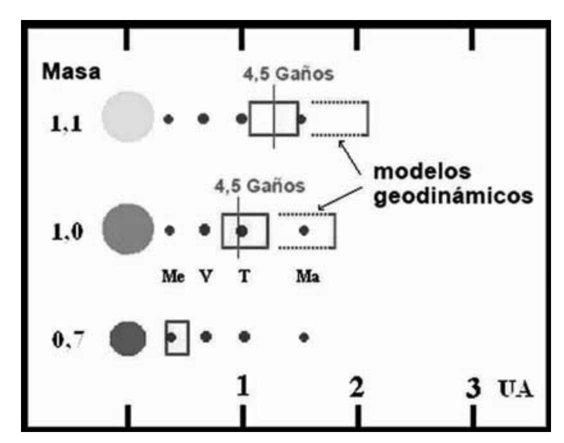


Fig. 5 – Zona de habitabilidad continua para diversas masas estelares, basadas en los límites "pesimistas" discutidas en el texto. Los cuadros continuos señalan los límites actuales. Modelos geodinámicos permiten una extensión de los límites externos a distancias más grandes en las fases iniciales de evolución estelar.

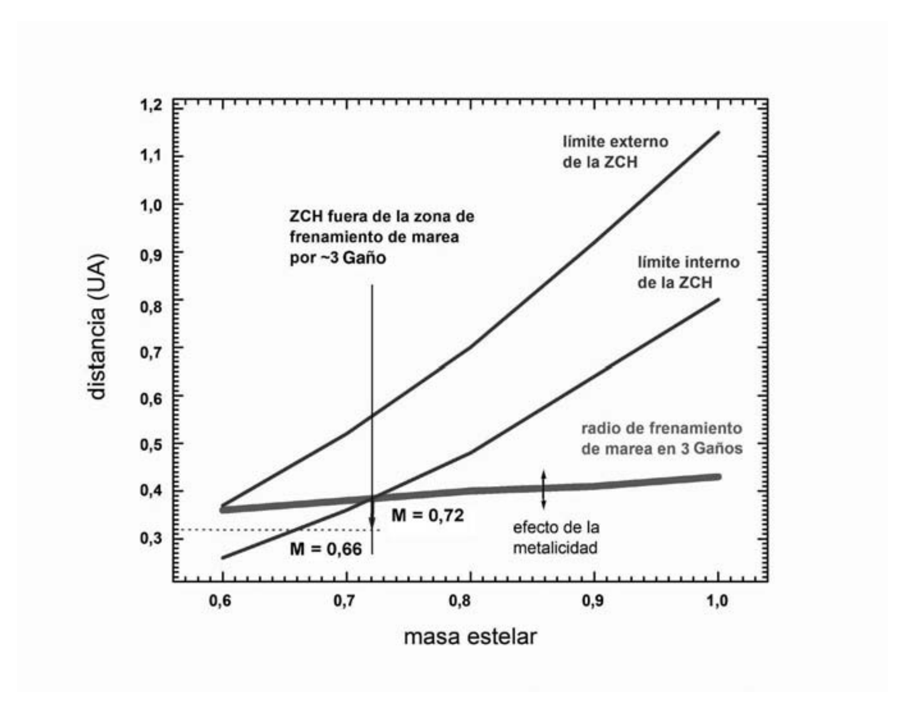


Fig. 6 – Zonas de frenado de marea para un tiempo de 3000 millones de años, para estrellas de metalicidad solar y distintas masas. Estrellas de masa superior a 0,7 masas solares tienen su zona de habitabilidad libre de problemas de frenado por alrededor de 3000 millones de años. El efecto de cambiar la metalicidad (y por consecuencia la luminosidad) de la estrella por un factor dos está ilustrado.

para impedir un daño climático intenso. Asimismo, mucho antes de que el planeta llegara a un frenado completo de marea, el daño climático sería seguramente considerable. Algunos resultados (Joshi et al. 1997) sugieren que un planeta de atmósfera suficientemente masiva podría mantener su temperatura bastante distribuida por medio de la circulación de masa entre los hemisferios, el iluminado y el oscuro. Pero para que este efecto resulte, serían necesarias atmósferas extremadamente más densas que la terrestre, lo que pone en duda su habitabilidad. Tales consideraciones, de manera conservadora, imponen un límite de masa inferior de aproximadamente 0,70 masas solares para que una estrella posea una zona de habitabilidad continua por 3000 o 4000 millones de años.

Otro aspecto posiblemente relevante cerca de las estrellas de menor masa, de clase K y M, es su prolongada fase de emisiones de alta energía, rayos-X y ultravioleta extremo (Güdel et al 1997, Ribas et al. 2005). Todas las estrellas de masa similar a la solar atraviesan fases iniciales de emisiones magnéticas mucho más intensas que las que la Tierra experimenta hoy. Pero, para masas estelares no muy distintas de la solar, la duración de esta fase es muy corta, no más que pocas decenas de millones de años. Este período es comparable a la fase de estabilización de masas y órbitas planetarias, y si algún efecto se hizo importante, fue en las muy incipientes fases de evolución de la Tierra. Sin embargo, dicha fase es mucho más larga en estrellas de masa inferior a la solar, posiblemente alcanzando alrededor de 1000 millones de años o más (Lammer et al. 2005, Griessmeier et al. 2005) Esta fase, asimismo, se acompaña con un viento estelar de partículas cargadas y de alta energía hasta miles de veces más intenso que el presente viento solar. Un viento suficientemente intenso puede oprimir el campo magnético planetario tan cerca de la superficie que la atmósfera se hace un obstáculo físico, y un proceso de erosión atmosférica puede llegar a provocar la remoción de material volátil del planeta, con la pérdida completa o drástica reducción de la atmósfera y los océanos del mismo. Un proceso similar, se cree, ha victimado a Marte en el principio de la evolución del Sistema Solar, ya que este planeta no dispone de un campo magnético protector como la Tierra. Los cálculos sugieren que incluso un planeta como la Tierra podría potencialmente perder sus volátiles si fuese sometido al viento estelar intenso y prolongado de la zona de habitabilidad de una estrella de pequeña masa. La baja rotación de planetas con una rotación frenada resultaría en un campo magnético todavía más débil que el normal, disminuyendo la protección precisamente cuando ella fuera más necesaria. Así, es razonable considerar estrellas de masas correspondientes a enanas M o enanas K de tipos

más fríos y de baja masa como objetos considerablemente menos interesantes astrobiologicamente que estrellas de tipo más similar al del Sol.

Dichas cuestiones siguen en la frontera del debate actual sobre habitabilidad, y tienen seguramente un impacto importante sobre la discusión astrobiológica general. Estrellas de pequeña masa son mucho más numerosas que estrellas de tipo solar. De hecho, aproximadamente 10% de las estrellas en la Vía Láctea pueden ser consideradas similares al Sol, mientras alrededor de 80% corresponden a las enanas M y enanas K frías. El hecho de que planetas con masa comparable a la de la Tierra estén siendo descubiertos en estrellas M, favorecidas, por su masa menor, por el método de detección por velocidades radiales, aumentó el interés teórico en investigar más profundamente los límites de las zonas de habitabilidad de estrellas de pequeña masa, y pueden esperarse cambios considerables en este tema para los próximos años.

Aceptando, por el momento, límites más conservadores, el intervalo de masa óptimo para considerar la habitabilidad planetaria bajo restricciones estrictamente conocidas, sugiere que estrellas cuyas masas se encuentren entre 0,7 y 1,2 masas solares son astrobiologicamente las más interesantes. Estos límites pueden ser algo relajados para estrellas de masas menores si éstas poseen metalicidad menor que la solar, ya que, para una misma masa, dichas estrellas son más luminosas y tienen zonas de habitabilidad más anchas y distantes. Para estrellas de clase F, masas más grandes pueden ser relevantes si uno acepta la posibilidad de evolución de la biosfera más rápida que en el caso de la Tierra.

4. Estrellas binarias o múltiples

Es todavía controversial el hecho de que estrellas binarias o múltiples deban ser consideradas candidatas de segunda clase para poseer planetas habitables de tipo terrestre. La estabilidad dinámica de planetas es posible en configuraciones específicas en estrellas que sean parte de un sistema múltiple.

El primer caso de zona de habitabilidad en estrellas múltiples corresponde al caso llamado externo. El planeta está, en una primera aproximación, en una situación estable si su distancia al centro de masa del sistema es suficientemente más grande que la separación entre las estrellas. En el caso interno, la distancia del planeta a su estrella huésped debe ser suficientemente menor

que la separación entre las estrellas. Estos resultados son muy dependientes de particularidades geométricas entre las órbitas planetarias y las estelares (Pendleton and Black 1993; Holmann & Wiegert 1999; Quintana et al. 2002). Los casos más estables ocurren cuando las órbitas de los planetas y las estrellas son coplanares, y sus sentidos de revolución son idénticos. Fuertes inestabilidades se hacen presentes en casos de coplanaridad inferior a 50º, para el caso interno. El sentido de rotación es menos crítico.

En estrellas binarias cuya órbita posee una excentricidad apreciable, la excitación de resonancias entre la excentricidad de la órbita planetaria y su ángulo de inclinación con el plano de la órbita estelar lleva a valores muy altos de excentricidad en la órbita planetaria, que ponen en peligro la estabilidad climática, aunque posiblemente no son lo suficientemente drásticos para imposibilitar la habitabilidad (Darren & Pollack 2002).

Es sabido que el proceso de formación y evolución dinámica en discos protoplanetarios, así como el proceso de condensación de planetesimales, son probablemente distintos en un sistema binario, en comparación con aquellos en estrellas aisladas, haciendo que la presencia de una estrella compañera en un sistema estelar esté básicamente en contra de la estabilidad planetaria dentro de zonas habitables. La probabilidad de condensación de planetesimales es fuertemente restringida por la inclinación entre las órbitas del disco y del sistema. Para inclinaciones grandes, la estabilidad orbital es fuertemente limitada (Quintana et al., 2002). También, la excitación de resonancias entre la excentricidad y la inclinación orbital disco-binaria produce excentricidades importantes en las órbitas de los planetesimales. Excentricidades grandes producen grandes velocidades de impacto durante las colisiones de planetesimales, que se cree son esenciales para la constitución de planetas. Los cálculos numéricos sugieren que velocidades excesivas dificultan, o bien impiden completamente, la condensación de planetas.

Así, aunque no haya razones teóricas claras para considerar estrellas múltiples o binarias enteramente inadecuadas en términos de interés astrobiológico, el conocimiento presente establece que análisis individuales de cada caso pueden ser necesarios para determinar con certeza si un determinado sistema estelar múltiple ofrece estabilidad dinámica a largo plazo en las zonas de habitabilidad de las estrellas componentes.

Un efecto que se superpone a la inestabilidad dinámica general de excentricidades y distancias orbitales planetarias en sistemas múltiples es el hecho de que aunque un planeta pueda permanecer miles de millones de años en órbitas estables, hay términos de corto período provocados por perturbaciones

impuestas por la estrella compañera. Para períodos orbitales del orden de un siglo o menos (Michtchenko & Porto de Mello 2009), las oscilaciones en la distancia orbital pueden llegar a ser fácilmente 100 veces más intensas que las sufridas por la órbita de la Tierra. Puesto que estas oscilaciones están asociadas a los ciclos de largo período que impulsan las grandes eras glaciales en la Tierra (los llamados ciclos de Kroll-Milankovitch), es razonable suponer que estrellas múltiples con períodos más cortos ofrezcan un medio ambiente considerablemente menos estable climáticamente que estrellas aisladas como el Sol.

5. Influencia de la evolución química de galaxias sobre propiedades estelares y planetarias

Diversas consideraciones recientes han implicado que algunos detalles de la evolución química de la Galaxia tengan una influencia importante en propiedades estelares y planetarias directamente vinculados a su habitabilidad. Esta evolución cambia, tras la acción de supernovas en escalas de tiempo de muchos miles de millones de años, la composición química del medio interestelar. Las estrellas formadas en cada generación reflejan la composición química de su época de formación; la proporción de elementos pesados o metales ha cambiado por un factor de casi cien mil desde los comienzos de la vida de la galaxia hasta el presente. La proporción de metales en un disco protoplanetario, o su metalicidad, está directamente vinculada con la probabilidad de formar planetas, lo que está claramente establecido por observaciones, por lo menos para planetas gigantes gaseosos (Santos et al., 2003, 2004; Fischer and Valenti, 2005). Aunque los detalles del proceso de formación planetaria permanezcan esencialmente desconocidos, los resultados preliminares sugieren un fuerte vínculo entre la presencia de metales y de planetas.

La masa de un planeta terrestre debe ser superior a un cierto mínimo para garantizar no solamente la presencia de océanos en la superficie, sino la propia supervivencia de la atmósfera. Modelos teóricos sugieren que la masa planetaria mínima debe ser superior a algunas veces la masa de Marte para que el planeta sea capaz de prevenir la erosión C, N y O de su atmósfera en escalas de tiempo de algunos miles de millones de años. Los resultados de Kasting et al. (1993) y Franck et al (1999, 2000ab) también sugieren que la zona de

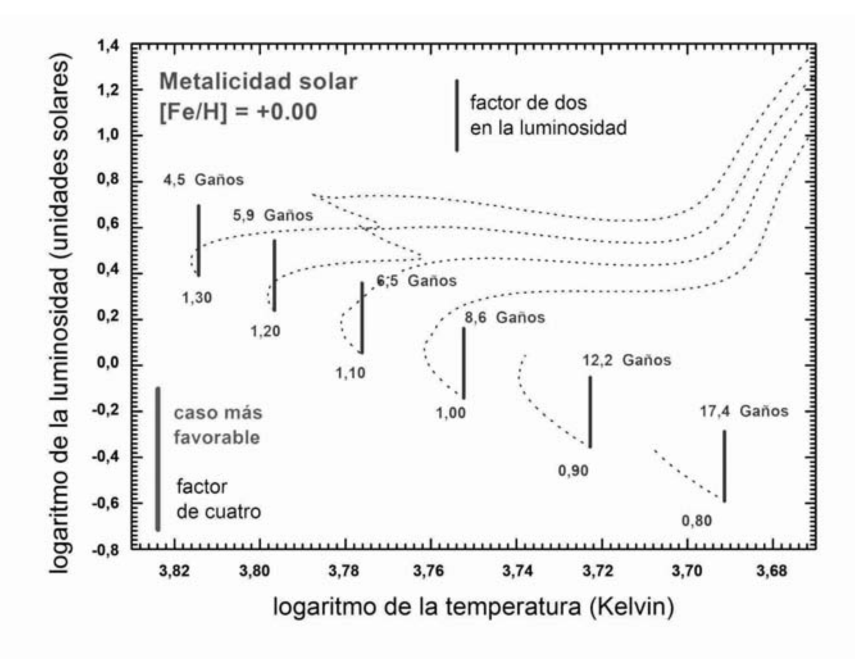


Fig. 7 – Tiempos de vida para estrellas de distintas masas y metalicidad solar. Las luminosidades iniciales están en los puntos de partida de las trayectorias evolutivas (en masas solares: líneas discontinuas). En las abscisas se muestra el logaritmo de la temperatura, en las ordenadas, el de la luminosidad. Las barras corresponden a un aumento de luminosidad de un factor dos (caso pesimista discutido en el texto), la barra contra el eje izquierdo inferior indica un factor cuatro (caso optimista). Las edades para llegar a un factor dos de aumento de luminosidad desde la edad cero están señaladas al lado de las trayectorias.

habitabilidad de planetas de masa más grande que la de la Tierra es más ancha, y una vez más la masa planetaria probable debe estar vinculada al contenido metálico del sistema (Fischer and Valenti, 2005). Por otro lado, parece interesante hallar una masa máxima para un planeta habitable. Un límite razonable parece ser algunas masas terrestres, ya que para valores superiores que este, un planeta puede retener una masa relativa de material volátil tan grande que puede llegar a ser totalmente recubierto por océanos (Ward and Brownlee, 2000; Léger et al., 2004). Este hecho puede evitar el cerramiento de ciclo carbonato-silicato por la ausencia del intemperismo superficial, aunque Franck et al. (2003) sostienen que una razón océanos-tierra más grande dejan el planeta más resistente a variaciones de flujo radiativo, así como a impactos.

¿Cuán típico debe ser el Sol en lo que respecta a su composición química? Algunos resultados apuntan a que el Sol puede ser una estrella considerable-

mente rica en metales para su edad, lo que lo hace quizás una de las primeras estrellas en la Galaxia a llegar a niveles de composición química adecuadas para mantener una biosfera compleja (Rocha-Pinto and Maciel, 1996). En esta interpretación, la Tierra puede bien pertenecer a una generación precoz de planetas habitables en la Galaxia.

La metalicidad también desempeña un papel fundamental en otro punto conectado directamente con propiedades planetarias de habitabilidad. El calor interno de la Tierra depende, en gran parte, de la desintegración radiactiva de isótopos inestables, como ^{40}K, ^{235}U, ^{238}U y ^{232}Th. Su abundancia relativa en la Galaxia es sintetizada por procesos de captura de neutrones en estrellas masivas o moderadamente masivas. González et al. (2001) ha sugerido, según modelos de evolución química de nuestra Galaxia, que la abundancia relativa de estos radioisótopos con relación al hierro (el elemento utilizado para representar el contenido bruto de metales en la Galaxia), está decreciendo con el tiempo y que futuros planetas terrestres van a generar menos calor radiogénico que la Tierra. Este hecho tiene consecuencias para su habitabilidad de largo plazo, pues el calor interno es la fuente de la convección del manto y la tectónica de placas en la Tierra, procesos directamente responsables por la mantenimiento del ciclo carbonato-silicato y el efecto invernadero homeostático. Estos mismos autores han propuesto, aunque especulativamente, que existe una ancha, pero definida, "ventana cósmica" para la formación de planetas terrestres adecuados en la Galaxia, y que generaciones pasadas y futuras de planetas terrestres pueden ser menos favorables a la mantenimiento de vida compleja que la Tierra.

Otro punto muy relevante para la geofísica planetaria es el hecho de que estrellas menos ricas en metales que el Sol tienen una proporción de magnesio y silicio con respecto al hierro más alta que el Sol, de acuerdo con resultados conocidos de la evolución química de la Galaxia (Edvardsson et al. 1993). Este hecho puede implicar que planetas terrestres hipotéticos en estrellas de menor metalicidad tengan una proporción distinta entre el manto, principalmente compuesto de rocas basadas en Mg-Si, y el núcleo, esencialmente compuesto de hierro y níquel. Esta proporción puede producir distintas propiedades de convección en el manto, con efectos sobre el ciclo carbonato-silicato y el funcionamiento del efecto invernadero. También puede generar distintos mecanismos de creación del campo magnético planetario, con consecuencias sobre la protección de la atmósfera contra partículas energéticas; y la proporción del contenido de isótopos radiogénicos en relación a la masa total.

Vemos así que detalles de composición química estelar, y sus efectos sobre la formación de planetas y sus propiedades, tienen influencia plausible e importante sobre la habitabilidad. Dentro de los límites bastante angostos del conocimiento actual, es razonable suponer que distintas épocas de formación de sistemas planetarios, reflejando distintas composiciones químicas, lleven a propiedades planetarias distintas en lo que respecta a habitabilidad, y que muchas de ellas pueden ser desfavorables frente a nuestra experiencia directa en la Tierra.

6. Órbitas galácticas

La órbita de una estrella alrededor de la Galaxia es un factor relevante, aunque muy poco mencionado, en relación al mantenimiento de la habitabilidad de un planeta. Estas cuestiones están despertando más interés una vez que se reconoció que la habitabilidad planetaria en un contexto más general debe estar conectada con el medio ambiente más allá del sistema planetario, lo que equivale a considerarse su entorno en la Galaxia y en el Universo, o sea, como parte integrante de grupos y aglomerados galácticos. La principal motivación para este nuevo enfoque se origina de dos temas, y el primero de ellos ha sido discutido en la sección anterior. El segundo tiene que ver con la importancia de la posición específica de una estrella y su planeta en el ambiente galáctico, lo que podría, bajo interpretaciones recientes, ofrecer peligro a largo plazo de eventos catastróficos con potencial de provocar extinciones en masa.

El Sol ocupa una posición particular en la Galaxia. Su órbita galáctica es mucho más circular que la media de las estrellas de su vecindad (Porto de Mello et al. 2006), lo que significa que la velocidad relativa del Sol en relación a los brazos espirales sufre pocos cambios en la órbita. Lo más notable, sin embargo, es que el Sol está muy cerca del llamado radio de co-rotación (Balázs, 2000; Lépine et al., 2001), en el cual las estrellas se mueven alrededor de la Galaxia con casi la misma velocidad de las ondas de densidad que constituyen los brazos espirales galácticos. Estas ondas son perturbaciones gravitacionales que barren el disco galáctico provocando sobredensidades locales. Estas sobredensidades, a su vez, facilitan la condensación de las nubes moleculares gigantes, objetos inmensos y con masa de centenares o miles de veces la masa del Sol. La vecindad de las nubes moleculares gigantes es el sitio más propicio

para el proceso de formación estelar a partir de condensaciones locales en las regiones más densas de las nubes. Puesto que el Sol se mueve con una velocidad casi idéntica a la de las ondas de sobredensidad, los encuentros del Sol con los brazos espirales, mientras éste sigue su órbita en el disco galáctico, son minimizados.

La proximidad de una estrella a los brazos espirales hace más probable que ésta se someta a la explosión cercana de una supernova –la violentísima explosión que señala el fin de la vida de las estrellas de gran masa. Radiaciones biológicamente letales, como rayos-X y gama, resultan de este tipo de explosión, y tienen un efecto devastador sobre la biosfera a distancias inferiores a 10 parsecs (Gehrels et al. 2003). No sólo la radiación directa de la explosión resultaría peligrosa, sino también radiaciones como la del ultravioleta extremo, que en realidad se puede termalizar en la atmósfera, pero destruye completamente la capa de ozono, dejando la superficie terrestre expuesta a los rayos UV del propio Sol.

Encuentros puramente gravitacionales, cercanos, con objetos muy masivos presentes en los brazos espirales, como las nubes moleculares gigantes y regiones de concentración de formación estelar, perturbarían la Nube Cometaria de Oort (Clube and Napier, 1982), un repositorio de cometas ubicado a una gran distancia del Sol, casi en el medio interestelar. Cometas con órbitas así perturbadas pueden caer en dirección al Sistema Solar interior y, con una componente inicial de momento angular muy baja, pueden desarrollar velocidades relativas muy grandes con respeto a los planetas internos. Impactos resultantes de tales episodios de bombardeo han sido sugeridos como causas de extinciones en masa en el pasado. De hecho, Leitch & Vasisht (2001) sostienen que una correlación entre pasajes del Sol por los brazos espirales están bien correlacionadas con episodios de extinción en masa desde el Cámbrico.

Este tema es, probablemente, más complejo que la discusión presentada. Las estrellas pueden adelantarse o retrasarse con respeto a la rotación de los brazos espirales, dependiendo de sus componentes relativas de velocidad rotacional más grandes o más pequeñas, respectivamente. Por un lado, con velocidades muy distintas respeto a los brazos, las estrellas los atraviesan con más frecuencia, pero lo hacen más rápidamente. Por otro lado, estrellas con bajas componentes de velocidad atraviesan los brazos infrecuentemente, como es el caso del Sol, pero el proceso de travesía consume un tiempo más largo. No está todavía claro qué proceso prevalece: Porto de Mello et al. (2009) han sugerido, integrando órbitas estelares de la vecindad solar en un modelo dinámico tridimensional, que el hecho de que el Sol posea una pequeña componente

vertical de velocidad, sumado a la posición cerca del radio de co-rotación, obliga al Sol a cruzar los brazos espirales siempre cerca de la parte más densa del disco. Estos cálculos muestran que en realidad el Sol tarda más tiempo atravesando los brazos que la mayoría de las estrellas cercanas. Estrellas con órbitas menos circulares y componentes de velocidad vertical más acentuada pasan menos tiempo en la proximidad de brazos espirales, y se exponen menos a sus peligros hipotéticos.

Es importante notar que, según Lépine et al. (2003), debido a la interacción resonante de las estrellas con los campos gravitacionales de las ondas de densidad, las órbitas estelares pueden desviarse distancias de hasta algunos kiloparsecs de sus configuraciones iniciales en escalas de tiempo de mil millones de años o menos. En esta visión, la historia particular de travesías de brazos espirales de cada estrella puede estar considerablemente influenciada por efectos aleatorios, introduciendo un elemento estocástico en el análisis de la importancia astrobiológica de las órbitas galácticas estelares.

7. Conclusión: seleccionando estrellas habitables

Esfuerzos recientes de seleccionar estrellas en la Galaxia en términos de su interés astrobiológico, muchos de ellos buscando restricciones relativas a los programas SETI (*Search for Extra Terrestrial Intelligence*), no siempre han incluido (Blair et al. 1992, Henry et al. 1995) todos los criterios aquí descritos. Entre los más completos (Turnbull & Tarter 2003ab, Porto de Mello et al. 2006), se destaca la exploración completa del catálogo Hipparcos (European Space Agency, 1997) de paralajes, cuyas medidas posibilitaron determinaciones de luminosidad estelar con errores de 2% o menos. La aplicación completa de restricciones de luminosidades, multiplicidad, metalicidades, edades estelares y órbitas galácticas representa el estado del arte de nuestro conocimiento del concepto de habitabilidad entendido en el ámbito planetario, estelar y galáctico.

Aunque sigue habiendo dudas fundamentales sobre los factores que permiten la existencia de biósferas complejas a largo plazo, quizás una dosis de optimismo pueda ser permitida al predecir que las próximas décadas serán testigo de progresos considerables en este campo. Alrededor del 10% de las estrellas del disco galáctico pueden ser consideradas similares al Sol, pero, de

éstas, solamente ~7% poseen propiedades de masa, metalicidad, multiplicidad, luminosidad y edad efectivamente similares de las del Sol. Si consideramos las estrellas que son realmente similares, incluyendo en la discusión las órbitas galácticas, no más del ~2 % pueden ser consideradas análogas solares.

Fig. 8 – El límite temporal de habitabilidad de la Tierra medido por la bioproductividad. La necesidad de disminuir la concentración de dióxido de carbono en la Tierra para mantener la temperatura hará imposible el proceso de fotosíntesis en el futuro, terminando con la biosfera.

Como temas frontera que claramente necesitan más estudios, subrayamos: el papel de la metalicidad estelar en el proceso de formación planetaria, y su importancia para el proceso de fraccionamiento en la condensación de planetas terrestres; la relevancia de la evolución química de la Galaxia y la época de formación de la estrella huésped para sus propiedades de habitabilidad; y la cuestión de las órbitas estelares como posibles factores de protección contra extinciones en masa provocadas por fenómenos galácticos.

Referencias

Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F. y Michel, H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous Tertiary extinction, *Science,* vol. 208: 1095. 1980.

Balázs, B. SETI and the galactic belt of intelligent life en ASP Conference Series 213, Bioastronomy '99: A New Era in Bioastronomy, G.A. Lemarchand y K.J. Meech, eds., San Francisco, Astronomy Society of the Pacific, pp. 441–444, 2000.

Becker, L., Poreda, R.J., Basu, A.R., Pope, K.O., Harrison, T.M., Nicholson, C. y Iasky, R. Bedout: a possible end-Permian impact crater offshore of Northwestern Australia, *Science,* vol. 304: 1469–1475, 2004.

Benton, M.J. y Twitchett, R.J. How to kill (almost) all life: the end-Permian extinction event, *Trends in Ecology & Evolution,* vol. 18: 358–365, 2003.

Blair, D.G., Norris, R.P., Troup, E.R., Twardy, R., Wellington, K.J., Williams, A.J., Wright, A.E. y Zadnik, M.G. A narrow band search for extraterrestrial inteligence (SETI) using the interstellar contact channel hypothesis, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 257: 105–109, 1992.

Blair Hedges, S., Blair, J.E., Venturi, M.L. y Shoe, J.L. A molecular timescale of eukaryote evolution and the rise of complex multicellular life, *BMC Evolutionary Biology,* vol. 4: 2–10, 2004.

Catling, D.C., Glein, C.R., Zahnle, K.J. y McKay, C.P. Why O_2 is required by complex life on habitable planets and the concept of planetary "oxygenation time", *Astrobiology,* vol. 3: 415–438, 2005.

Clube, S.V.M. y Napier, W.M. Spiral arms, comets and terrestrial catastrophism, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society,* vol. 23: 45–66, 1982.

Courtillot, V. *Evolutionary Catastrophes: The Science of Mass Extinctions*, Cambridge, Cambridge University Press, 2002.

Darren M. W. y Pollard, D. Earth-like worlds on eccentric orbits: excursions beyond the habitable zone, *International Journal of Astrobiology*, vol. 61: 69, 2002.

Dole, S.H. *Habitable Planets for Man*, New York, Blaisdell, 1964.

Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., Lambert, D.L., Nissen, P.E. y Tomkin, J. The chemical evolution of the galactic disk. I. Analysis and results. *Astronomy and Astrophysics,* vol. 275: 101–152, 1993.

European Space Agency *The Hipparcos Catalogue*, Special Publication 120, Noordwijk, The Netherlands, ESA Publications Division, 1997.

Fischer, D.A. y Valenti, J. The planet-metallicity correlation, *Astrophysics Journal,* vol. 622: 1102–1117, 2005.

Forget F., Pierrehumbert R. T., Warming Early Mars with Carbon Dioxide Clouds That Scatter Infrared Radiation, *Science*, vol. 278: 1273–1276, 1997.

Franck, S., Kossacki, K. y Bounama, C. Modelling the global carbon cycle for the past and future evolution of the Earth system, *Chemical Geology,* vol. 159: 305–317: 1999.

Franck, S., von Bloh, W. y Bounama, C. Determination of habitable zones in extrasolar planetary systems: where are Gaia's sisters?, *Journal of Geophysical Research*, vol. 105: 1651–1658, 2000.

Franck, S., Block, A., von Bloh, W., Bounama, C., Schellnhuber, H.-J. y Svirezhev, Y. Habitable zone for Earth-like planets in the solar system, *Planetary and Space Science,* vol. 48: 1099–1105, 2000.

Franck, S., Cuntz, M., von Bloh, W. y Bounama, C. The habitable zone of Earth-mass planets around 47 UMa: results for land and water worlds, *International Journal of Astrobiology*, vol. 2: 35–39, 2003.

Gehrels, N., Laird, C.M., Jackman, C.H., Cannizzo, J.K., Mattson, B.J. y Chen, W. Ozone depletion from nearby supernovae, *Astrophysics Journal,* vol. 585: 1169–1176, 2003.

González, G., Brownlee, D. y Ward, P. The galactic habitable zone: galactic chemical evolution, *Icarus,* vol. 152: 185–200, 2001.

Griessmeier, J.M., Stadelmann, A., Motschmann, U., Belisheva, N.K., Lammer, H. y Biernat, H.K. Cosmic ray impact on extra-solar Earth-like planets in close-in habitable zones, *Astrobiology,* vol. 5: 587–603, 2005.

Güdel, M., Guinan, E. y Skinner, S.L. The X-ray Sun in time: a study of the long term evolution of coronae of solar-type stars, *Astrophysics Journal,* vol. 483: 947–960, 1997.

Henry, T.J., Soderblom, D., Baliunas, S., Davis, R., Donahue, R., Latham, D., Stefanik, R., Torres, G., Duquennoy, A., Mayor, M., Andersen, J., Nordstrom, B. y Olsen, E. The current state of target selection for NASA's High Resolution Microwave Survey en ASP Conference Series 74, Progress in the Search for Extraterrestrial Life, 1993 *Bioastronomy Symposium*, G.S. Shostak, ed., Astronomy Society of the Pacific, San Francisco, pp. 207–217, 1995.

Holman, M.J. y Wiegert, P.A. Long term stability of planets in binary systems, *Astronomy Journal,* vol. 117: 621–628, 1999.

Huang, S.S. Occurrence of life in the universe*, Scientific American*, vol. 7: 397–402, 1959.

Joshi, M.M., Haberle, R.M. y Reynolds, T.R. Simulations of the atmospheres of synchronously rotating terrestrial planets orbiting M dwarfs: conditions for atmospheric collapse and the implications for habitability, *Icarus,* vol. 129: 450–467, 1997.

Kasting, J.F. Planetary atmosphere evolution: do other habitable planets exist and can we detect them?, *Astrophysics and Space Science,* vol. 241: 3–24, 1996.

Kasting, J.F. y Catling, D. Evolution of a habitable planet, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics,* vol. 41: 429–463, 2003.

Kim, Y.C., Demarque, P., Yi, S.K. y Alexander, D.R. The Y2 isochrones for alpha-element enhanced mixtures, *Astrophysics Journal Supplement Series*, vol. 143: 499–511, 2002.

Lammer, H., Kulikov, Y.N., Penz, T., Leitner, M., Biernat, H.K. y Erkaev, N.V. Stellar-planetary relations: atmospheric stability as a prerequisite for planetary habitability, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, vol. 92: 273–285, 2005.

Lawson, P.R., Unwin, S.C. y Beichman, C.A. *Precursor Science for the Terrestrial Planet Finder*, JPL publication 04-014, Pasadena, CA.. Jet Propulsion Laboratory, Disponible en línea: http://planetquest.jpl.nasa.gov/ documents/RdMp273.pdf, 2004.

Léger, A., Selsis, F., Sotin, C., Guillot, T., Despois, D., Mawet, D., Ollivier, M., Labèque, A., Valette, C., Brachet, F., Chazelas, B. y Lammer, H. A new family of planets? "Ocean-Planets", *Icarus,* vol. 169: 499–504, 2004.

Leitch, E.M. y Vasisht, G. Mass extincitions and the Sun's encounters with spiral arms, *New Astronomy Reviews*, vol. 3: 51–56, 1998.

Lépine, J.R.D., Mishurov, Y.N. y Dedikov, S.Y. A new model for the spiral structure of the Galaxy: superposition of 2- and 4-armed patterns, *Astrophysics Journal,* vol. 546: 234–247, 2001.

Lépine, J.R.D., Acharova, I.A. y Mishurov, Y.N. Co-rotation, stellar wandering, and fine structure of the Galactic abundance pattern, *Astrophysics Journal,* vol. 589: 210–216, 2003.

Michtchenko T. & Porto de Mello G.F., Dynamical Stability of Habitable Planets in Astrobiologically Interesting Binary Stars, Proceedings, *Bioastronomy 2007*: Molecules, Microbes and extraterrestrial Life, in press, 2009.

Mischna M.M., Kasting J.F., Pavlov A.A., Freedman R. Influence of Carbon Dioxide Clouds on Early Martian Climate, *Icarus*, vol. 145: 546–554, 2000.

Pendleton, Y.J. y Black, D.C. Further studies on criteria for the onset of dynamical instability in general three-body systems, *Astronomy Journal,* vol. 88: 1415–1419, 1993.

Porto de Mello, G.F., del Peloso, E.F y Ghezzi, L. Astrobiologically Interesting Stars within 10 Parsecs of the Sun, *Astrobiology*, vol. 6: 308-331, 2006.

Porto de Mello, G.F., Lépine, J.R. y Dias,W.S., Astrobiologically Interesting Stars near the Sun: Galactic Orbits and Mass Extintctions, Proceedings, *Bioastronomy 2007*: Molecules, *Microbes and extraterrestrial Life*, in press, 2009.

Quintana, E.V., Lissauer, J.J., Chambers, J.E. y Duncan, M.J. Terrestrial planet formation in the Centauri system, *Astrophysics Journal,* vol. 576: 982–996, 2002.

Rampino, M. R., Supereruptions as a Threat to Civilizations in Earth-like Planets, *Icarus*, vol. 156: 562-569, 2002.

Ribas, I., Guinan, E.F., Güdel, M. y Audard, M. Evolution of the solar activity over time and effects on planetary atmospheres. I. High energy irradiances (1–1700 Å), *Astrophysics Journal*, vol. 622: 680–694, 2005.

Rocha-Pinto, H.J. y Maciel, W.J. The metallicity distribution of G dwarfs in the solar neighbourhood, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 279: 447–458, 1996.

Santos, N.C., Israelian, G., Mayor, M., Rebolo, R. y Udry, S. Statistical properties of exoplanets. II. Metallicity, orbital parameters, and space velocities, *Astronomy and Astrophysics,* vol. 398: 363–376, 2003.

Santos, N.C., Israelian, G. y Mayor, M. Spectroscopic [Fe/H] for 98 extra-solar planet-host stars: exploring the probability of planet formation, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 415: 1153–1166, 2004.

Segura, A., Krelove, K., Kasting, J.F., Sommerlatt, D., Meadows, V., Crisp, D., Cohen, M. y Mlawer, E. Ozone concentrations and ultraviolet fluxes on Earth-like planets around other stars, *Astrobiology,* vol. 3: 689–708, 2003.

Tarter, J. The search for extraterrestrial intelligence (SETI), *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 39: 511–548, 2001.

Turnbull, M.C. y Tarter, J. Target selection for SETI. I. A catalog of nearby habitable stellar systems, *Astrophysics Journal Supplement Series,* vol. 145: 181–198, 2003.

Turnbull, M. C. y Tarter, J. Target selection for SETI. II. Tycho-2 dwarfs, old open clusters, and the nearest 100 stars, *Astrophysics Journal Supplement Series*, vol. 149: 423–436, 2003.

Ward, P.D. y Brownlee, D. *Rare Earth: Why Complex Life is Uncommon in the Universe*, New York, Copernicus Edition, Springer-Verlag, 2000.

Yi, S.K., Kim, Y.C. y Demarque, P. The Y2 stellar evolutionary tracks, *Astrophysics Journal Supplement Series,* vol. 144: 259–261, 20

Capítulo 5

Planetas Extrasolares

Andrea Sánchez Saldías

Resumen En este capítulo se analizará el conocimiento que se tiene hasta la fecha acerca de planetas que giran en torno a estrellas diferentes a nuestro Sol (planetas extrasolares). Se verán en forma comparativa los distintos métodos de detección y la tecnología necesaria en cada caso, así como las misiones presentes y futuras para su búsqueda. Se compararán sus características con las de nuestro Sistema Solar, el desafío que eso implica para los modelos de formación del mismo, y posibles explicaciones al respecto. Si bien se proporciona al final del capítulo la bibliografía correspondiente, se sugiere como fuente básica de datos la Enciclopedia de Planetas Extrasolares (http://exoplanet.eu/)

Abstract In this chapter we will analyse what is thus far known about planets orbiting stars different from our Sun (extrasolar planets). The different detection methods and the technology needed in each case will be studied comparatively, as well as the current and future missions aimed at their detection. Their characteristics will be compared to those of our Solar System, considering as well the challenges they pose to its formation models and possible explanations for them. Although the bibliography is provided at the end of this chapter, The Extrasolar Planets Encyclopaedia (http://exoplanet.eu/) is strongly recommended as a basic data source.

Andrea Sánchez Saldías (✉)

Departamento de Astronomía, Facultad de Ciencias (UDELAR), Iguá 4225, 11400 Montevideo, Uruguay

andrea@fisica.edu.uy

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería,* vol. 1, 107 - 122, © 2010 UNESCO-Montevideo.

1. Introducción

La II Escuela Iberoamericana de Astrobiología se enmarca en una serie de onomásticos, y si bien todos ellos son relevantes, tal vez el más publicitado a nivel mundial fue la declaración de Naciones Unidas del año 2009 como Año Internacional de la Astronomía. Este reconocimiento correspondió al cumplimiento de los 400 años de las primeras observaciones telescópicas realizadas por Galileo Galilei (1564-1642). Como claro exponente del 'hombre renacentista' Galileo incursionó en varias áreas del conocimiento, en aspectos teóricos y experimentales, pero la relevancia de sus trabajos es complementada con lo que puede considerarse los comienzos de la aplicación del método científico. Son por todos conocidas las consecuencias que en la sociedad de su época y particularmente en las autoridades de la Iglesia Católica, tuvieron las publicaciones de algunos de sus trabajos donde se daban una serie de pruebas observacionales de que la Tierra no podía ser el centro del Sistema Solar y que describía una órbita alrededor del Sol. El 21 de junio de 1633, tras abjurar públicamente de sus ideas, es condenado a arresto domiciliario hasta el día de su muerte.

Pero un contemporáneo de Galileo, tal vez de manera más conceptual y sin evidencias científicas concretas, pero con una visión tremendamente amplia para su época, fue más allá en el desafío al saber convencional y aceptado. Giordano Bruno (1548-1600) había expresado en 1584: "*Existen innumerables soles e innumerables tierras, todas ellas rotando en torno a sus soles, en la misma forma que lo hacen los siete planetas de nuestro sistema. Sólo vemos los soles, porque son los cuerpos más grandes y más luminosos, pero sus planetas resultan invisibles al ser pequeños y poco luminosos. Los innumerables mundos en el Universo no son peores ni están más deshabitados que nuestra Tierra.*" A pesar de su condición de sacerdote católico, o tal vez a causa de ella, en el mes febrero del 1600, tras 8 años de arresto y un proceso de juicio llevado a cabo por Roberto Belarmino (quien después dirigiría el proceso a Galileo), se lo sentenció como 'herético y obstinado'. Se le expulsa de la iglesia y sus trabajos son quemados en la plaza pública. Se le condena a pagar el precio que la inquisición tenía reservado para quienes no se retractaban: Giordano Bruno muere quemado vivo en la hoguera el 17 de febrero de 1600.

En 1995 Michel Mayor y Didier Queloz (Mayor y Queloz, 1995) descubren desde el Observatorio de Ginebra, el primer sistema planetario fuera de nuestro Sistema Solar, alrededor de la estrella 51Pegasi. Habían transcurrido casi 400 años desde la muerte de Giordano Bruno, pero finalmente había

comenzado una búsqueda que desde el punto de vista filosófico nos acerca un paso más a responder nuestra eterna pregunta sobre la vida en el Universo: ¿estamos solos?

Desde el punto de vista científico-tecnológico es el comienzo de una nueva rama en el estudio de las Ciencias Planetarias.

A esta búsqueda y sus resultados hasta el día de hoy está dedicado este capítulo.

2. Nuestro Sistema Solar

Antes de comenzar a analizar los métodos de detección de planetas extrasolares, brevemente describiremos un escenario planetario muy estudiado y con un modelo de formación acorde a las características observadas: nuestro Sistema Solar.

Nuestro Sol concentra el 99,9 % de la masa del Sistema pero solo el 2% del momento angular.

Cada planeta está aislado en el espacio, con distancias cada vez mayores entre sí a medida que nos alejamos del Sol.

Las órbitas son cuasi-circulares y cuasi-coplanares y los planetas rotan en la misma dirección que el Sol. En la región planetaria existen dos zonas bien diferenciadas, la de los planetas terrestres o Sistema Solar interior (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), que se caracterizan por ser rocosos, densos, no muy masivos (el mayor tiene una masa de 6×10^{24} kg), pequeños y con pocos o ningún satélite. Más allá de las 5 Unidades Astronómicas (1 UA es la distancia media entre la Tierra y el Sol), nos encontramos en la zona de los planetas jovianos o Sistema Solar exterior. Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno son planetas esencialmente gaseosos, poco densos, muy masivos (la masa de Júpiter es $1{,}9\times10^{27}$ kg.), de gran tamaño y con muchos satélites. Todas estas características se explican por un modelo de formación a partir de una nebulosa solar primitiva, que al girar se fue aplanando hasta tener forma de disco (Figura 1 a, b). En el centro se formó el Sol (Figura 1 c) y como subproducto los planetas a través de un proceso de acreción donde podemos señalar algunos estadíos importantes, como la formación de *planetesimales* (objetos de hasta unos 100 km de diámetro de formas irregulares) que por atracción gravitatoria dan lugar a *embriones planetarios* (objetos de algunos cientos de km que conviven en su zona con objetos similares) para finalmente formar *Planetas* (objetos esféricos

que giran en torno al Sol y que lograron limpiar los remanentes de la formación en su zona de influencia gravitatoria) (Figura 1. d, e, f)

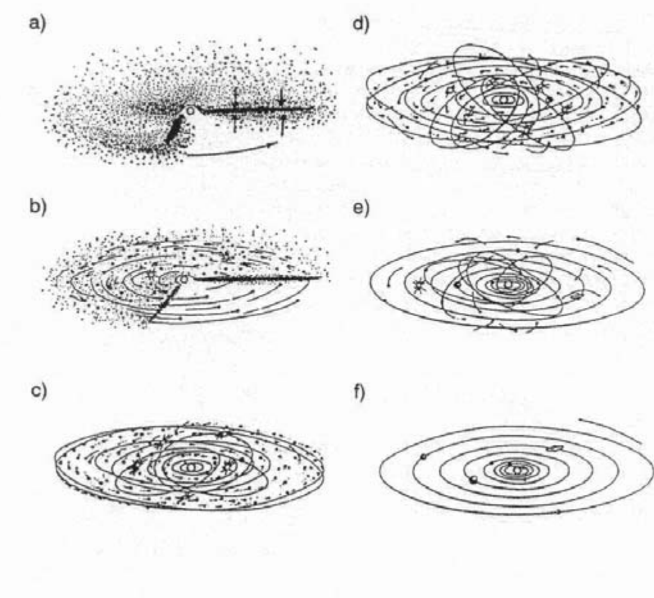


Fig. 1 - Proceso de formación del Sistema Solar. Cortesía Gonzalo Tancredi

Los planetas del Sistema Solar exterior se formaron en condiciones de temperatura tales que el agua se encuentra en forma de hielo, más allá de una línea imaginaria entre 4 y 5 UA conocida como la 'línea de nieve', por lo cual lograron acretar este material aumentando su eficiencia gravitatoria y capturar rápidamente gran parte del gas de la nebulosa protosolar. Esto explica que las colisiones a baja velocidad de material rocoso, del tipo de silicatos, seguido por un proceso de acreción relativamente lento haya dado lugar a planetas sólidos y menos masivos más cerca del Sol y un proceso de acreción acelerada con aporte de hielo y gas de la nebulosa haya dado lugar a planetas masivos y gaseosos más lejos de nuestra estrella. Los primeros reportes de planetas extrasolares, y sus características físicas y dinámicas tales como masa, composición, períodos de traslación y distancia a la estrella, resultaron todo un desafío a este modelo tan consistente hasta ese momento.

Una última acotación a la formación de sistemas planetarios, es la relacionada con el límite superior de masa de los compañeros estelares. Como criterio de orden astrofísico se considera que un planeta debe tener una masa inferior a 13 masas de Júpiter (M_J) dado que por encima de ese valor nos

enfrentamos a un objeto sub-estelar, que no es capaz de sostener reacciones nucleares como las estrellas, pero puede fusionar Deuterio en lo que se conoce como la 'quema del Deuterio'. A estos objetos se les denomina enanas marrones, y podemos considerar como ejemplo a Gliese229B, que se encuentra a 19 años luz de la Tierra y tiene más de 20 M_J.

3. Métodos de detección de planetas extrasolares

La observación directa, es decir la detección de fotones provenientes directamente del planeta, es muy dificultosa debido a la relación de brillos entre la estrella central y el/los planetas. Si observáramos el Sistema Solar desde una distancia de 5 parsec (1 pc equivale a 202.265 UA) el Sol sería 10^9 veces más brillante que Júpiter en longitudes de onda correspondientes al visible, y si bien la relación mejora en el infra-rojo con un valor de 10^5 veces, nuestro planeta más masivo no sería detectado y podría llegarse a la conclusión errónea que nuestro Sol no tiene planetas a su alrededor. Es por este motivo que los métodos más exitosos han sido en un principio los métodos indirectos, aunque esta tendencia está cambiando a medida que mejoran las técnicas de detección y la tecnología asociada a ellas.

3.1. Determinación de la velocidad radial

La medida de las variaciones de velocidad radial de una estrella deducidas del corrimiento de las líneas espectrales en forma periódica hacia el rojo y el azul permiten deducir que esa estrella está experimentando un movimiento de tipo trompo, generado por la presencia de un perturbador planetario en la medida que el sistema se mueve en torno al centro de masas (Figura 2). Esto se corresponde con el efecto Doppler, pero señalamos una vez más que esto permite medir la variación de velocidad solamente en la línea de mira del observador.

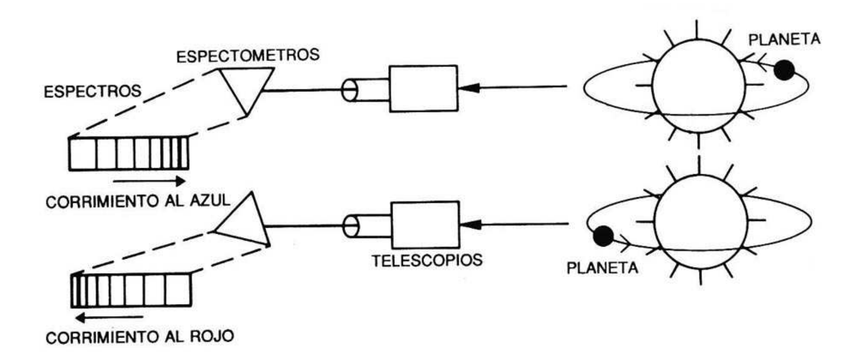


Fig. 2 - Corrimiento Doppler periódico de las líneas espectrales. Imagen reproducida con autorización de Lemarchand, (1992).

Si consideramos un planeta de masa M_P en una órbita circular de radio a en torno a una estrella de masa M_*, ambos se moverán en torno al centro de masa del sistema. Si igualamos la fuerza gravitatoria con la fuerza centrípeta (asumiendo que la masa del planeta es mucho menor que la de la estrella), la máxima velocidad radial de la estrella está dada por la ecuación

$$V^2 = G\,(M_P \;\sin i)^2 \qquad (1)$$

donde G es la constante de gravitación universal, e i es la inclinación del plano orbital del planeta, es decir el ángulo que forma la normal al plano orbital del planeta respecto a la línea de visual del observador entre la Tierra y la estrella. También es posible determinar el período P, que corresponde al tiempo en que el planeta completa una órbita en torno a la estrella.

El problema que presenta el método de determinación de la velocidad radial es que no es posible determinar la masa del planeta sino que ésta siempre se encuentra ponderada por el factor de *sin i***,** por lo cual lo que es posible obtener es una masa mínima para el compañero planetario. Si la órbita es circular, la gráfica de la velocidad radial se corresponderá con una sinusoide, pero es posible determinar de la forma de la curva de variación de velocidad radial la excentricidad de la órbita.

Esta técnica es la más efectiva para encontrar planetas masivos orbitando cerca de estrellas de tipo solar (tipos espectrales G y K).

Como los primeros descubrimientos estuvieron asociados a búsquedas de planetas en torno a estrellas similares al Sol, esto introdujo un sesgo observa-

cional donde la gran mayoría de los planetas encontrados desafiaban tanto las características físicas de nuestro Sistema Solar como el modelo de formación antes descripto.

3.2. Tránsitos

Este método consiste en observar fotométricamente la estrella, es decir medir el flujo de intensidad de luz que recibimos de ella y detectar sutiles cambios en la intensidad cuando un planeta orbita por delante de ella. En la situación óptima la inclinación orbital *i* del planeta será cercana a 90 grados y para planetas cercanos a la estrella se verá en un período de tiempo razonable un 'eclipse' periódico debido al tránsito. Cuanto mayor sea el planeta, mayor será la caída en la intensidad, y con este método es posible determinar el ángulo de inclinación *i*, el radio del planeta y el radio de la estrella. Si se cuenta con una cobertura observacional de tiempo prolongado es posible además conocer el período del planeta y con métodos espectroscópicos determinar la presencia de atmósfera e incluso de sus componentes.

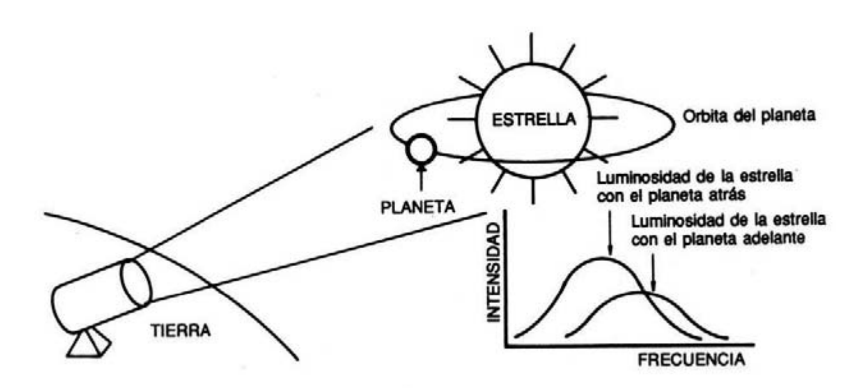


Fig. 3 - Disminución de la intensidad de la estrella debido al pasaje de un planeta. Imagen reproducida con autorización de Lemarchand, (1992).

La primera publicación reportando un tránsito planetario (Charbonneau et. al, 2000) corresponde al planeta HD 209458 b, el cual se encuentra a 0,046 UA

de la estrella y tiene un período de 3,5 días (Henry et. al, 2000). El radio tentativo para el planeta es 1,32 R_J (Knutson et al., 2007) lo cual nuevamente nos conduce a un planeta de composición gaseosa y muy grande para su distancia relativa a la estrella y comparado con los de nuestro Sistema Solar. De hecho surgió una denominación técnica para planetas con masas iguales o mayores a las de Júpiter, composición gaseosa y período orbital menor a tres días: 'Júpiter calientes' o 'hot Jupiters'

Si trasladáramos esta situación a nuestro Sistema Solar, una ocultación del Sol por la Tierra tendría una caída de 0,008% y una duración de 13 horas, mientras que si el planeta eclipsante fuera Júpiter la profundidad sería del 1% y una duración de 30 horas .

En el año 2006 se puso en órbita el telescopio CoRoT (**Co**nvexión, **Ro**tación y **T**ránsitos- de Europa y Brasil), destinado precisamente a la búsqueda de planetas extrasolares por el método de tránsitos y en el 2009 se reportó el hallazgo del planeta CoRoT 7b, primer planeta rocoso descubierto por este método. El período es de 20,4 horas, la distancia a la estrella es de 0,0167 UA, la masa es del orden de 5 a 11 masas terrestres y el radio es de 1,7 radios terrestres (Leger et al, 2009), (Queloz et al. 2009)

Por otra parte los avances tecnológicos en fotometría han permitido que la sonda KEPLER (NASA), lanzada en 2009, tenga sensibilidad suficiente como para detectar planetas del tamaño de la Tierra.

3.2.1. Espectroscopía en tránsitos

Un complemento para el método de detección u observación de tránsitos, es la observación espectroscópica en diferentes longitudes de onda, lo cual permite inferir la presencia de líneas de absorción correspondientes a la presencia de atmósfera en el planeta. El primer reporte (Charbonneau et al., 2002) se basó en datos tomados por el Telescopio Espacial Hubble en 600 nanómetros (nm) del planeta HD 209458 antes mencionado, donde se encontraron las líneas de absorción del sodio que habían sido predichas por los modelos teóricos de los 'Júpiter calientes' (Sudarsky et al., 2003).

La búsqueda se extendió a las regiones del infra-rojo (IR) donde se encontraron líneas de absorción de CO, H_20 y CH_4. Cabe destacar la importancia que para la potencial habitabilidad planetaria tienen estas moléculas, aunque los 'Júpiter calientes' no cumplen con otros requisitos indispensables para la

existencia de vida. Se ha extendido la región del espectro en que se observa, por ejemplo al ultravioleta (UV) y se han llevado a cabo estudios y detecciones que dan indicios de posibles estructuras de las atmósferas, por ejemplo la presencia de nubes (Deming et al., 2005; Kosinen et al., 2010)

3.3. Astrometría de precisión

La detección de planetas en torno a estrellas mediante astrometría implica tener datos observacionales muy precisos de la posición de la estrella. Podemos definir el movimiento propio de una estrella como la medida del cambio de su posición en el cielo a lo largo del tiempo, y permite determinar la velocidad transversal de la estrella con respecto a la Tierra. En 1916 E. E. Barnard descubrió la estrella con mayor movimiento propio (10,3 segundos de arco/año) y en 1969, Piet van de Kamp culmina más de 25 años de trabajo astrométrico con el anuncio de dos planetas de tipo Júpiter en órbitas circulares de 12 y 26 años. Si bien errores en el método utilizado llevaron a concluir que ese anuncio era incorrecto, lo que podemos señalar de este antecedente histórico es la idea central de que la posición de la estrella varía con el tiempo en el caso de tener compañeros planetarios, pero que se requiere un tiempo de observación prolongado.

Si consideramos el movimiento de la estrella y el planeta respecto a su centro de masa, la variación de la posición de la estrella se puede calcular como:

$$a_E = a_p \, M_P / M_E \qquad (2)$$

donde M_P y M_E son las masas del planeta y la estrella y a_E y a_p son las distancias al centro de masa de la estrella y el planeta respectivamente. A partir de esta ecuación podemos ver que este método favorece la detección de planetas masivos distantes de la estrella. Asimismo, permite determinar la masa absoluta y la inclinación del plano orbital del planeta, y dado que lo que se observa es la variación angular, el efecto es más notorio en estrellas cercanas y siendo más propicios hasta una distancia de algunos parsecs de la Tierra. En este momento no se dispone de la precisión necesaria para aplicar exitosamente este método y detectar un número apreciable de planetas, pero la situación seguramente cambiará drásticamente a partir del 2012 en que se pondrá en órbita la misión GAIA (ESA: Agencia Espacial Europea), cuyo objetivo es medir distancias y

movimientos de 10^9 estrellas con una resolución de 10-20 micro segundos de arco (para enfatizar la resolución de esta misión recordemos que la estrella de Barnard tenía una variación de 10 segundos de arco/ por año)

3.4. Microlentificado

La teoría de la Relatividad General predice que la luz de un objeto fuente puede ser desviada debido a su interacción con la masa de otro objeto que se encuentra entre la fuente y el observador, haciendo variar su magnitud aparente durante el evento. Por analogía con fenómenos ópticos, a este fenómeno se le llamó lente gravitacional, y cuando hablamos de detección de objetos de masas del orden de estrellas o planetas, independientemente de lo débil que pueda ser su intensidad, el fenómeno se denomina microlentificado. Dos campañas de búsqueda se destacan en la utilización de este método: OGLE (**O**ptical **G**ravitational **L**ensing **E**xperiment, Observatorio de las Campanas, Chile, operado por la Carnegie Institution de Washington) (Abe, 2004) y MOA (**M**icrolensing **O**bservations in **A**strophysics, Japón/Nueva Zelandia) (Bond et al., 2002)

Un reporte muy interesante (Gaudi et al., 2008) consistió en la comunicación del hallazgo de un sistema múltiple con planetas de 0,71 M_J y 0,27 M_J y órbitas a una distancia a la estrella de ~ 2,3 y ~ 4,6UA. La estrella es de 0,5 M_{sol} y se encuentra a una distancia de 1,5 kpc de la Tierra. Los autores señalan que '*2006-BLG-109Lb, c es como un sistema a escala de nuestro Sistema Solar en lo que refiere a la relación de masas, de distancia a la estrella y con una temperatura de equilibrio de los planetas similar a Júpiter y Saturno'*

3.5. Observación directa

Como señalamos al principio, la observación directa —es decir capturar la luz en el rango del visible o el IR reflejada por el planeta en torno a su estrella— es tremendamente dificultoso debido a la relación de brillo planeta/estrella. Sin embargo, en los últimos años ha sido exitosa la búsqueda de gigantes gaseosos en órbitas lejanas a estrellas jóvenes (tipo espectral A). Los resultados más notorios son los descubrimientos de planetas en torno a Fomalhaut, HR 8779 y Beta Pictoris (Kalas et al. 2008, Marois et al. 2008, Lagrange et al. 2010) Todas estas estrellas son de tipo A y se encuentran a una distancia de la Tierra del orden de 40 pc.

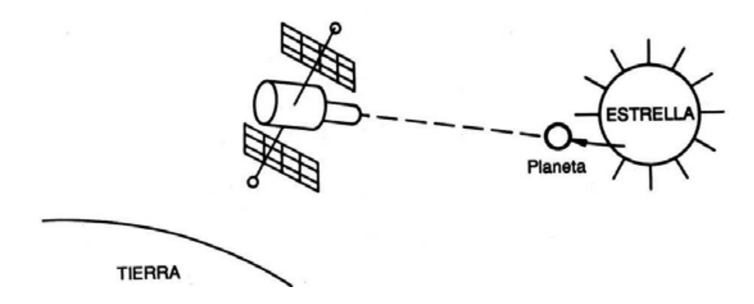


Fig. 4 - Observación directa de un planeta extrasolar. Imagen reproducida con autorización de Lemarchand, (1992).

3.6. Medición de los retardos en las señales de los púlsares

Mide retardos temporales en la señal emitida por objetos no estrictamente estelares (fuera de la secuencia principal), como púlsares, enanas blancas pulsantes y sub-enanas pulsantes tipo B.

Este método permitió la detección del primer sistema planetario extrasolar en torno a un púlsar en 1990 (Wolszczan & Frail 1992), y hasta 2010 ha permitido detectar un total de 10 planetas alrededor de 6 púlsares. No obstante, esta metodología no se ha consolidado como un pilar fundamental en la búsqueda de planetas del tipo terrestre dentro de las zonas de habitabilidad. Los especialistas consideran que las hostiles condiciones ambientales alrededor de dichos planetas los hacen poco probables para el surgimiento y desarrollo de la vida.

4. El desafío al modelo de formación de nuestro Sistema Solar

4.1. Planetas masivos y gaseosos cercanos a su estrella.

Se han descubierto muchos planetas del tamaño y masa de Júpiter (y superiores) muy cerca de la estrella central. Esto contradice la hipótesis de la 'línea de hielo'.

Pero, como la primera técnica utilizada fue la de detección por variación de la velocidad radial y la misma sigue siendo ampliamente utilizada (ver Sección 2.1), cuando la resolución es baja, solamente es posible detectar planetas gigantes y el efecto es más notorio cuando los planetas están más cerca de la estrella. Esto introdujo al principio un sesgo observacional que generaba la impresión que la distribución de masas planetarias en nuestro Sistema Solar era la excepción y no la regla.

El mecanismo de migración explica este tipo de escenarios. Los planetas gigantes se formarían más allá de las respectivas líneas de hielo y luego migrarían hacia el interior. Este tipo de desplazamiento del planeta hacia la estrella se conoce como migración de tipo II. Si un planeta es suficientemente masivo (del orden de 10 masas terrestres o más) al terminar su formación, limpia la zona del disco a su alrededor, pero en este proceso se da una interacción continua con el disco circundante.

Si consideramos la masa de un pequeño anillo de gas es exterior a la órbita del planeta, éste girará más despacio en torno a la estrella y por intercambio de cantidad de movimiento el planeta acelerará el gas enviándolo hacia afuera, mientras que él se enlentece.

Si por el contrario, analizamos el mismo proceso pero para un anillo de gas interior al planeta, ahora éste frenará el gas enviándolo hacia adentro, pero el planeta se acelera. Si esta interacción con el interior y el exterior fuera lineal, el planeta compensaría el cambio en su cantidad de movimiento con la región interior y exterior. Pero como la zona externa de gas es mayor, el resultado neto es que el planeta experimenta un torque que lo frena en cada interacción y comienza a describir un movimiento espiral hacia la estrella (Raymond et al., 2006; Trilling et al., 2002). Cabe destacar que escenarios de migración planetaria han sido ampliamente estudiados para nuestro propio Sistema Solar, i.e. (Tsiganis et. al, 2005; Levison y Morbidelli, 2003)

Recientemente, Howard et al. (2010) realizaron un estudio de la tasa de aparición de planetas extrasolares cercanos a su estrella (con períodos orbitales menores que 50 días) basándose en mediciones Doppler de 166 estrellas de tipo solar. En este estudio se encontró que la región de exoplanetas con masas entre 5 y 30 masas terrestres y período orbital inferior a 50 días está bien poblada, lo cual nuevamente entra en contradicción con las predicciones teóricas. La extrapolación de una ley de potencias que ajustó las mediciones predice que el 23% de las estrellas de tipo solar albergan planetas de masa terrestre (0,5 – 2,0 M_{Tierra}) en órbitas cercanas.

4.2. Planetas alrededor de estrellas enanas de tipo M

Las estrellas de tipo espectral M son estrellas 'frías' y pequeñas, pero constituyen el 70 % de las estrellas en la vecindad solar (Tarter et al. 2007). Su rango de masas está entre 0,5 M_{SOL} y 0,1 M_{SOL}, por lo cual son poco brillantes. Sin embargo, los programas de búsqueda de planetas extrasolares han comenzado a incluírlas entre sus objetivos por motivos relacionados con la larga vida de estas estrellas y la ubicación relativa de la línea de hielo (concepto que describimos en la sección 1)

4.3. La metalicidad de la estrella

Un aspecto que puede estar relacionado con la migración planetaria es que la mayoría de los gigantes gaseosos se han encontrado en estrellas de considerable metalicidad, es decir que la relación [Fe/H] es del orden de 0,2 o mayor (Marcy et al., 2005; Sozzetti et al., 2009). Una explicación posible es que debido a la migración hacia la estrella, planetas menos masivos y rocosos no puedan haber frenado su movimiento hacia el interior y terminaran colisionando con la estrella, enriqueciéndola en materiales pesados (Israelian et al., 2001) mientras que los 'Júpiter calientes' detuvieron su migración a corta distancia la estrella central. El otro escenario es que la condición para que se formen planetas es un disco enriquecido en materiales pesados (aquellos que no son hidrógeno ni helio), lo que lleva a que la propia estrella tenga una metalicidad importante (Fischer y Valenti, 2005). Cabe destacar que la relación causa-efecto es opuesta en estas dos explicaciones.

5. Conclusiones

En los 15 años que han transcurrido desde el reporte de Mayor y Queloz de un planeta en torno a una estrella que no es nuestro Sol, y mediante la aplicación del del método científico, hoy sabemos que el sueño de Giordano Bruno es una realidad. Se han detectado mas de 500 planetas extrasolares, algunos formando sistemas múltiples.

El avance continuo, tanto de herramientas que posibilitan modelos teóricos (por ejemplo software y hardware), como tecnológicos (telecomunicaciones, poder de resolución de los instrumentos, redes de almacenamiento de datos) ha posibilitado el uso de distintos métodos desde la Tierra y desde misiones en órbita. Esto ha posibilitado que a las detecciones de inhóspitos planetas gaseosos cercanos a su estrella les hayan sucedido reportes de planetas rocosos, cada vez más parecidos a la Tierra. Durante la redacción de este texto, el 29 de Setiembre de 2010, se reporta el descubrimiento de Gliese581g (Vogt et al., 2010), el primer planeta de tamaño del orden del nuestro, con gravedad suficiente para poseer atmósfera, y dentro de lo que se considera la zona de habitabilidad, con la posibilidad de agua líquida en su superficie. Pocos días más tarde, el 11 de octubre de 2010, un investigador de otro equipo de búsqueda, cuestiona la existencia de ese planeta asociando el error a la interpretación de los datos utilizados en los que faltaba incluir medidas del presente año (Kerr, 2010). Como es fácil concluir, no solamente es importante contar con una cantidad relevante de datos, sino que las interpretaciones son también polémicas. El debate respecto a la existencia de Gliese 581g continúa.

Los análisis de atmósferas que ya han comenzado y que siguen perfeccionándose nos dirán si en algún planeta existen trazas de vida; un exceso de oxígeno puede indicar la presencia de análogos a las algas verde-azules que llevaron a nuestra Tierra a tener el 21% de oxígeno que tiene hoy nuestra atmósfera. Lo mismo puede ocurrir con el metano o con otros compuestos químicos asociados a actividad biológica (ver capítulo de A. Segura). Puede ser que esa vida sea lo que consideramos simple o primitiva en nuestra evolución, es también posible que haya tomado otros caminos evolutivos y rutas metabólicas. Eventualmente puede haber desarrollado la capacidad de comunicarse, lo que implicaría un complejo sistema nervioso asociado a lo que denominamos inteligencia. En cualquier caso, independientemente de que las generaciones venideras sean capaces de detectar vida o no en otros planetas, el conocimiento que se irá adquiriendo será enorme y en el camino aprenderemos mucho más de nosotros mismos y de nuestro planeta.

"A veces creo que hay vida en otros planetas, y a veces creo que no. En cualquiera de los dos casos la conclusión es asombrosa."

Carl Sagan (1934-1996)

Referencias

Abe, F. et al. Search for Low-Mass Exoplanets by Gravitational Microlensing at High Magnification, *Science,* vol. 305: 1264 – 1266, 2004.

Bond, I. et al. Study by MOA of extrasolar planets in gravitational microlensing events of high magnification. *MNRAS*, vol. 333: 71, 2002.

Borucki, W. et al. Kepler's Optical Phase Curve of the Exoplanet HAT-P-7b, *Science,* vol. 325: 709, 2009.

Brown, T., Charbonneau, D., Ronald L., Gilliland, R., Noyes, R. y Burrows, A. HST Time-Series Photometry of the Transiting Planet of HD 209458, *Astrophysical Journal,* vol. 552: 699, 2001.

Butler, R., Vogt, S., Marcy, G., Debra, A., Fischer, D., Wright, J., Henry, G., Laughlin, G y Lissauer, J. A Neptune-Mass Planet Orbiting the Nearby M Dwarf GJ 436, *Astrophysical Journal*, vol. 617: 580. 2004.

Charbonneau, D., Brown, T., Noyes, R. y Gilliland, R. Detection of an Extrasolar Planet Atmosphere, *ApJ*, vol 568: 377, 2002.

Charbonneau, D., Brown, T., Latham, D. y Mayor, M. Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star, *Astrophysical Journal Letters*, vol.529: 45, 2000.

Deming, D., Brown, T., Charbonneau, D., Harrington, J. y Richardson, L. A new search for carbon monoxide absorption in the transmission spectrum of the extrasolar planet HD 209458b, *Astrophysical Journal*, vol.622: 1149, 2005.

Fischer, D. y Valenti, J. The Planet-Metallicity Correlation. *Astrophysical Journal* vol. 622:1102, 2005.

Gaudi, et al. Discovery of a Jupiter/Saturn Analog with Gravitational Microlensing. *Science*, vol. 319: 927, 2008.

Henry, G., Marcy, G., Butler, P. y Vogt, S. A transiting "51-Peg-like" planet, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 529: 41, 2000.

Howard, A.W. et al. The Occurrence and Mass Distribution of Close-in Super-Earths, Neptunes and Jupiters, *Science*, vol. 330: 653, 2010.

Israelian, G., Santos, N., Mayor, M. y Rebolo, R. Evidence for planet engulfment by the star HD82943, *Nature*, vol. 411: 163, 2001.

Kalas P. et al. Optical images of an exosolar planet 25 light years from Earth, *Science*, vol. 322:1345, 2008.

Kerr, R. First Goldilocks Exoplanet may not exist. *Science*, vol. 330:433.2010

Knutson, H., Charbonneau, D., Noyes, R., Brown, T. y Gilliland, R. Using stellar limb-darkening to refine the properties of HD 209458b, *Astrophysical Journal*, vol. 655: 564, 2007.

Koskinen, T. et al. Characterizing the thermosphere of HD209458b with UV transit observations. *Astrophysical Journal*, vol. 723: 116, 2010.

Lagrange, A-M. et al. A giant planet imaged in the disk of the young star Beta Pictoris. *Science*, vol. 329: 57, 2010.

Léger, A. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 506: 287, 2009.

Lemarchand, G. A., El llamado de las estrellas, Buenos Aires, Lugar Editorial, 1992.

Levison H. y Morbidelli, A. The formation of the Kuiper belt by the outward transport of bodies during Neptune's migration. *Nature*, vol. 426: 419, 2003.

Marois C. et al. Direct imaging of multiple planets orbiting the star HR 8799. *Science*, vol. 322: 1348, 2008.

Marcy, G., Butler, R., Fischer, D., Vogt, S., Wright, J., Tinney, C. y Jones, H. Observed Properties of Exoplanets: Masses, Orbits, and Metallicities. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, vol. 158, 2005

Mayor, M. y Queloz, D. Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star, *Nature*, vol. 378: 355, 1995.

Nakajima, T., Oppenheimer, B., Kulkarny, S., Golimowsky, D., Mathews, K. y Durrance, S. Discovery of a cool brown dwarf. *Nature*, vol. 378: 463. 1995

Pal, A. et al. HAT-P-7b: An extremely hot massive planet transiting a bright star in the Kepler field. *Astrophysical Journal,* vol. 680: 1450, 2009.

Queloz, D. et al. The CoRoT-7 planetary system: two orbiting super-Earths. *Astronomy and Astrophysics,* vol. 506: 303-319. 2009

Raymond, S., Mandell, A., y Steinn S. Exotic Earths: Forming Habitable Worlds with Giant Planet Migration. *Science*, vol. 313:1413. 2006.

Sozzetti, A. et al. On the Frequency of Gas Giant Planets in the Metal-Poor Regime. *Proceedings of the International Astronomical Union*, vol. 5: 416. 2009.

Sudarsky, D., Burrows, A. y Hubeny, I. Theoretical Spectra and Atmospheres of Extrasolar Giant Planets, *Astrophysical Journal*, vol.588: 1121, 2003.

Tarter, J.C. et al. A re-appraisalof the habitability of planets around M dwarf stars. *Astrobiology*, vol.7: 30, 2007.

Trilling, D., Lunine, J. y Benz, W. Orbital migration and the frequency of giant planet formation. *Astronomy and Astrophysics* vol. 394: 241, 2002.

Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A. y Levison, H. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System, *Nature* vol. 435: 459, 2005.

Vogt, S., Butler, P., Rivera, E., Haghighipour, N., Henry, G. y Williamson, M. The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: A 3.1M_T Planet in the Habitable Zone of the Nearby M3V Star Gliese 581. *Astrophysical Journal* (en prensa), 2010.

Wolszczan, A. y Frail, D. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+ 12, *Nature*, vol. 355: 145, 1992.

Capítulo 6

Cometas y su relevancia para el origen y desarrollo de la vida

Julio Ángel Fernández

Resumen: Los cometas son los cuerpos más primitivos del Sistema Solar que se conocen. Su origen se remonta a la formación del propio Sistema Solar, en el disco protoplanetario de polvo y gas que rodeaba al naciente Sol. En dicho disco se formaron, por condensación y posterior aglomeración de granos, pequeños cuerpos sólidos -denominados planetesimales- que por posterior acreción formaron los planetas. Los planetesimales formados en la región planetaria exterior resultaron ricos en hielo de agua y compuestos de carbono. El hielo en el interior de cuerpos formados a partir de estos planetesimales se pudo haber derretido dando origen a océanos subterráneos que en algunos casos se pueden haber preservado hasta el presente. Ya que la vida está asociada a la presencia de agua líquida y compuestos ricos en carbono, los cometas y otros objetos ricos en hielo como los satélites de los planetas gigantes y los objetos transneptunianos, aparecen como objetos interesantes para la búsqueda de vida, o al menos ambientes prebióticos más allá de la Tierra. Incluso los cometas pudieron haber aportado a través de impactos los ingredientes necesarios a la Tierra primitiva para la emergencia de la vida.

Abstract: Comets are the most primitive objects known in the solar system. Their origin dates back to the formation of the solar system itself, in the protoplanetary disk of dust and gas that surrounded the nascent Sun. In such a disk, small solid bodies -called planetesimals- formed what, by later accretion, grew to planets. The planetesimals formed in the outer planetary region turned out to be rich in water ice and carbon compunds. The water ice in the interior of bodies formed with these planetesimals could have melted, giving rise to underground oceans that, in some cases, could have been preserved until the present time. Since life is associated to the presence of liquid water and carbon-rich compounds, comets and other ice-rich objects, like satellites of the giant planets and transneptunian objects,

Julio Ángel Fernández (✉)

Departamento de Astronomía, Facultad de Ciencias (UDELAR), Iguá 4225, 11400 Montevideo, Uruguay julio@fisica.edu.uy

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 123 - 146, © 2010 UNESCO-Montevideo.

appear as interesting candidates for the search for life or, at least, prebiotic environments beyond the Earth. Comets could have even supplied through impacts the necessary ingredients to the primitive Earth for the emergence of life.

1. La formación del Sistema Solar. El concepto de "línea de nieve"

Para entender la relevancia de los cometas dentro de contextos astronómicos, cosmogónicos y de emergencia de vida, debemos comenzar analizando brevemente las teorías de formación del Sistema Solar y de otros sistemas planetarios.

El Sistema Solar se formó a partir de la contracción gravitacional de una nube de polvo y gas, similar a las que se observan actualmente en otras regiones de nuestra galaxia y de otras galaxias. Las observaciones muestran que una estrella no se forma aislada sino en grupos formando lo que se denomina un cúmulo de estrellas (Figura 1). Las nubes moleculares en donde se forman nuevas estrellas tienen temperaturas muy bajas del orden de $T \cong 10$ K y densidades del orden de $n \sim 10^2$ moléculas H_2 cm^{-3}, llegando en las regiones más densas hasta $n \sim 10^{4-5}$ moléculas H_2 cm^{-3} (ver, p. ej., Blitz 1993). Es justamente en las zonas más densas donde la materia puede contraerse en protoestrellas, cuando la autogravedad de una región densa supera a la presión de gas que se opone a la contracción, es decir cuando:

Autogravedad > Presión térmica

que se traduce en la condición para la masa mínima M_J que puede colapsar de:

$$M_J \approx 10 \frac{T^{3/2}}{\sqrt{n}} M_{Solar} \tag{1}$$

donde M_J se conoce como la masa de Jeans. Si sustituimos en esta ecuación los valores numéricos de temperatura y densidad indicados más arriba obtenemos: $M_J \cong 1M_{Solar}$. Es decir, el colapso gravitacional se produce justamente para masas típicas del orden de la del Sol (M_{Solar}).



Fig. 1 - El cúmulo del Trapecio en la nebulosa de Orión (NASA-Hubble Space Telescope).

El telescopio espacial Hubble mostró impresionantes imágenes de estrellas en formación rodeadas de discos de polvo y gas (Figura 2), conocidos como discos *protoplanetarios*, en donde presumiblemente con el tiempo se formarán planetas (p. ej. Beckwith & Sargent 1993). Presumimos que nuestro propio Sistema Solar se formó en una forma similar. Es interesante notar que en las nubes moleculares gigantes, donde se forman estrellas, se han detectado una gran cantidad de moléculas orgánicas que luego se van a incorporar a los cuerpos que se formen en esas regiones.

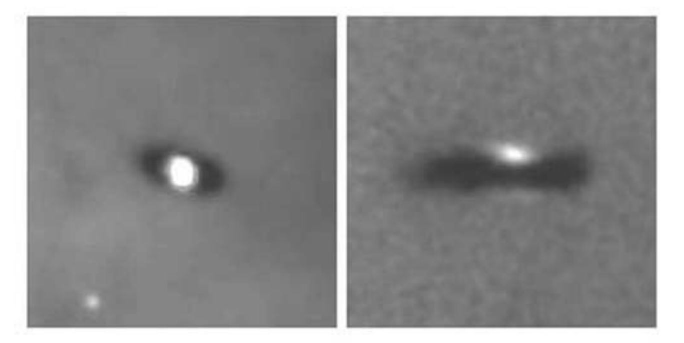


Fig. 2 - Imágenes del Telescopio Espacial Hubble de 2 discos protoplanetarios en la nebulosa de Orión iluminados en sus zonas centrales por la luz proveniente de sus estrellas jóvenes (McCaughrean & O'Dell 1996).

Se encuentra que la vida media de los discos protoplanetarios es de unos $\sim 10^4$ años. El gas circundante es barrido por el fuerte flujo de radiación UV de estrellas cercanas calientes de los tipos O y B, y/o por fuertes vientos estelares desde la estrella central (Hollenbach et al. 2000). La relativa corta vida de los discos protoplanetarios indica que los planetas se deben formar rápidamente, en caso contrario el material del disco se dispersaría, dejando a la estrella central sin planetas, o con planetas muy pequeños. Estas observaciones sugieren que en nuestro Sistema Solar los planetas gigantes gaseosos Júpiter y Saturno tuvieron que formarse rápidamente para capturar sus extensas envolturas gaseosas de hidrógeno y helio, posiblemente en escalas de tiempo de $\lesssim 10^7$ años.

Podemos resumir la formación del Sistema Solar en las etapas que se muestran en Figura 3. A partir del colapso de una nube de gas y polvo, denominada *nebulosa solar*, se forma el protosol rodeado de un disco achatado producto de su rotación alrededor del protosol (Figura 3a). La mayor densidad dentro del disco permite la condensación en granos y su posterior acreción hasta formar multitud de pequeños cuerpos del tamaño de algunos km denominados *planetesimales* (Figura 3b). Los planetesimales continuan creciendo por colisiones mutuas hasta dejar unos pocos planetas aislados entre sí en órbitas cuasi circulares y coplanares (Figura 3c). Los planetas desvían los planetesimales residuales por perturbaciones gravitacionales hacia las regiones interiores cercanas al Sol y hacia el exterior (Figura 3d)

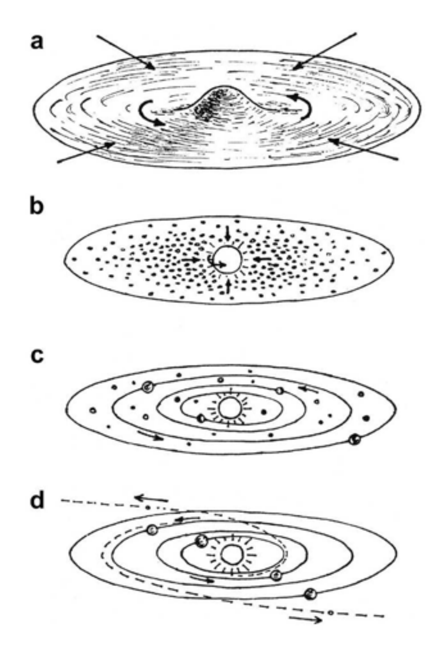


Fig. 3 - Las distintas etapas de la formación del Sistema Solar y la dispersión del material residual: (a) Colapso gravitacional de la nube de gas y polvo en el protosol y el disco protoplanetario; (b) formación en el disco de planetesimales de tamaño típico de algunos km; (c) acumulación de planetesimales en un número reducido de embriones planetarios; (d) crecimiento oligárquico en unos pocos planetas masivos y dispersión de los planetesimales residuales por interacciones gravitacionales con los planetas formados (Fernández 2005).

1.1. Condensación de los diferentes materiales en función de la distancia heliocéntrica

Las temperaturas en el disco protoplanetario eran muy elevadas en las zonas próximas al Sol, entre aproximadamente 300 y 1000 Kelvin en la zona donde se formaron los planetas terrestres, lo que no permitió que el agua condensara. Sólo los materiales más refractarios, como el Fe, Ni, y diversos óxidos metálicos y silicatos, condensaron en esa zona y constituyeron la materia prima de los planetas terrestres. Los materiales más volátiles como el agua y compuestos carbonosos se incorporaron a posteriori, gracias al flujo de material desde zonas exteriores más frías del disco protoplanetario. Gracias a este material la vida floreció en la Tierra. Sin el agua y la materia orgánica nuestro planeta hubiera permanecido como un cuerpo rocoso totalmente árido.

En la zona del cinturón asteroidal, las temperaturas del disco eran lo suficientemente bajas ($\lesssim$ 250 Kelvin) como para que el agua condensara, apor-

tando entonces más materia prima sólida a los planetesimales allí formados y con una composición rica en agua. Ese borde de transición en el disco protoplanetario entre la condensación y no condensación del agua se denomina la *línea de nieve*. Los planetas gigantes se formaron muy rápidamente al disponer en su entorno de mayor cantidad de material sólido gracias a la condensación del vapor de agua. Una vez que sus núcleos sólidos crecieron hasta masas varias veces superiores a la de la Tierra, pudieron capturar gravitacionalmente grandes cantidades de H y He de la nebulosa solar. Los fuertes campos gravitacionales de los planetas gigantes dispersaron los planetesimales residuales ricos en hielo, parte de esos planetesimales alcanzaron la zona de los planetas terrestres de composición rocosa, dotándolo de una capa exterior rica en agua y compuestos orgánicos (p. ej. Chyba 1987, Ip & Fernández 1988). No se puede pues dejar de señalar la potencial relevancia de este proceso para el desarrollo de la vida en la Tierra.

1.2. La edad de la Tierra y del Sistema Solar

El método más preciso para datar la antigüedad de la Tierra y del Sistema Solar (asumiendo que la formación fue simultánea) es el basado en el decaimiento radioactivo de ciertos isótopos de larga vida (ver Tabla 1). Se han datado hasta el momento con este método rocas terrestres, lunares y meteoritos. Los resultados muestran que la edad del Sistema Solar es de unos 4600 millones de años. En comparación, los registros más antiguos de fósiles es de unos 3500 millones de años y hay indicios de que la vida ya estaba presente en la Tierra hace 3800 millones de años (Schidlowski 1988).

Tabla 1 - Vidas medias de algunos isótopos de uso común en geocronología

Padre	Hijo(s) estable(s)	Vida media $t_{1/2}$ (Gyr)
^{40}K	^{40}Ar, ^{40}Ca	1,25
^{87}Rb	^{87}Sr	48,8
^{232}Th	^{208}Pb, ^{4}He	14
^{235}U	^{207}Pb, ^{4}He	0,704
^{238}U	^{206}Pb, ^{4}He	4,47

2. Cometas

Los cometas provienen de las poblaciones residuales ricas en hielo (formados más allá de la línea de nieve) que permanecieron luego de la formación de los planetas en ciertos nichos estables del Sistema Solar. Sus apariciones son en algunos casos espectaculares pues muestran una cabellera o coma y dos o más colas dirigidas en la dirección opuesta al Sol (Figura 4). No es de extrañar entonces que los cometas hayan despertado la atención y el temor de la gente desde la más remota antigüedad. Para una revisión histórica se pueden consultar los libros de Bailey et al. (1990) y Yeomans (1991). En épocas más recientes estos objetos comenzaron a ser analizados desde otro punto de vista: no como mensajeros de la destrucción, sino como los que pudieron proporcionar los materiales básicos para el surgimiento de la vida en la Tierra (ver el trabajo pionero de Oró 1961).



Fig. 4 - Imagen CCD del cometa C/2000 WM1 (LINEAR) obtenida con el Telscopio Centurión de 46 cm del Observatorio Astronómico de Los Molinos (cortesía Raúl Salvo y Santiago Roland, OALM).

2.1. Características de sus órbitas

Al contrario de las órbitas de los planetas que son casi circulares y coplanares, los cometas se mueven en general en órbitas muy excéntricas con períodos orbitales muy variados, que van desde algunos años hasta millones de años, e inclinaciones muy diversas de 0° a 180°. La amplitud de su órbita está definida por el semieje mayor *a*, que está relacionado a su período orbital a través de la 3ra Ley de Kepler: $P=a^{3/2}$ (*P* en años, *a* en UA[2]). Otros elementos son la

2 La unidad astronómica (UA) es la distancia media Tierra-Sol = km

excentricidad e que define la forma de la órbita, y la inclinación i con respecto al plano de la eclíptica (Figura 5). La distancia al perihelio q nos define la distancia de mínimo acercamiento al Sol y está dada por: $q=a(1-e)$.

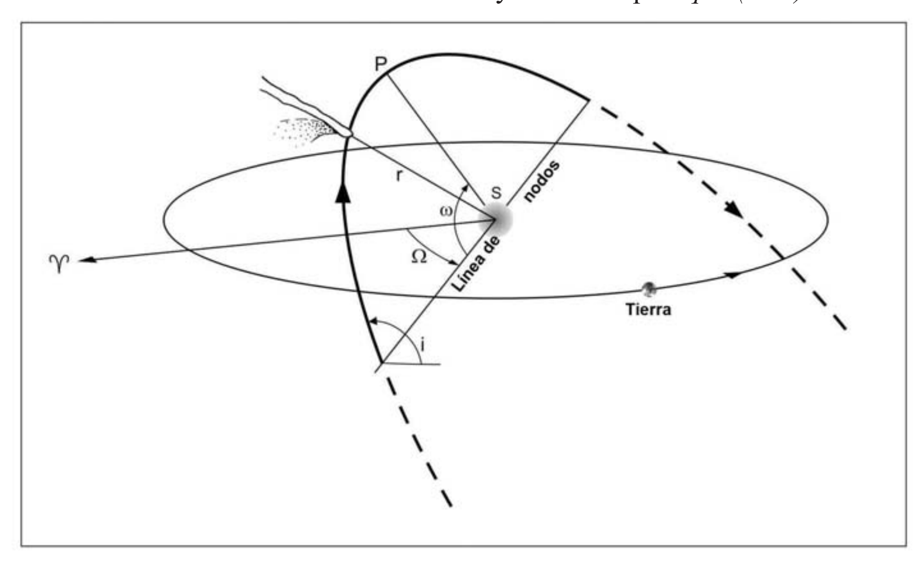


Fig. 5 - Elementos orbitales (tomado de Fernández 2005).

Un parámetro importante de la órbita de un cometa es su energía orbital E que está dada por

$$E=-\frac{G M_{Solar}}{2a} \tag{2}$$

donde G es la constante de gravitación universal y M_{Solar} la masa del Sol. Expresaremos la energía por la variable más conveniente $x \cong 1/a$, que es la inversa del semieje mayor de la órbita. Referida a esta variable, tendremos que una órbita elíptica tiene una energía $x > 0$, una órbita parabólica $x = 0$, mientras que una órbita hiperbólica $x < 0$.

2.2. Clasificación de cometas

Tradicionalmente se han clasificado los cometas de acuerdo a sus períodos orbitales en tres tipos:

1) Cometas de largo período ($P > 200$ años)
2) Cometas tipo Halley ($20 < P < 200$ años)
3) Cometas de la Familia de Júpiter ($P < 20$ años)

Los cometas de largo período (CLP) muestran órbitas con inclinaciones aleatorias entre 0° y 180°, los cometas de tipo Halley muestran también órbitas con todas las inclinaciones en el rango (0° , 180°) aunque hay un neto predominio de órbitas directas (es decir, con inclinaciones $i < 90°$), mientras que los cometas de la Familia de Júpiter (CFJ) tienen inclinaciones típicas bajas ($i \lesssim 30°$). Debemos aclarar que los límites establecidos son convencionales. No obstante, los 3 tipos definidos caracterizan bastante bien a poblaciones cometarias procedentes de distintas fuentes.

3. Los grandes reservorios cometarios: la nube de Oort y el cinturón transneptuniano

En 1950 el astrónomo holandés Jan H. Oort notó que una gran proporción de CLPs tenían energías en el estrecho rango $0 < x < 100$ (en unidades de 10^{-6} UA^{-1}) (o sea, semiejes mayores $a > 10^4$ UA) (Figura 6). Esa gran concentración de cometas en órbitas cuasiparabólicas indicaba que a distancias superiores a las 10^4 UA existía una población de cometas muy numerosa, que Oort (1950) estimó en 10^{11}. En honor a este astrónomo esta población de cometas se denominó *Nube de Oort*. Es de destacar en Figura 6 el muy pequeño número de cometas con órbitas originales hiperbólicas ($x < 0$), lo que sugiere que los cometas son miembros del Sistema Solar y no provienen del espacio interestelar. Por órbitas originales entendemos aquellas que tienen los cometas antes de ingresar a la región planetaria y ser perturbados por los planetas que modifican sus órbitas. Si los cometas fueran intrusos provenientes del espacio interestelar, tendríamos que observar que sus órbitas originales son hiperbólicas.

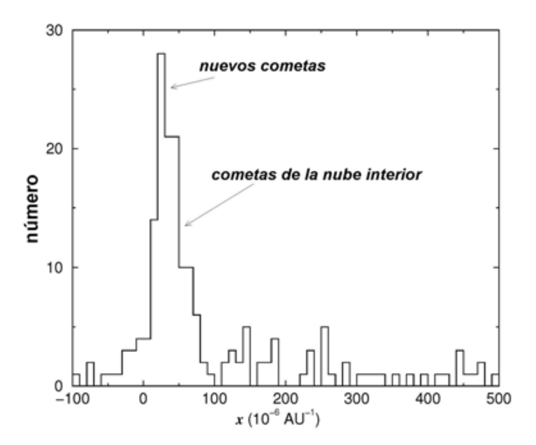


Fig. 6 - Distribución de las energías orbitales de cometas de largo período con energías $x < 500 \times 10^{-6}$ UA^{-1} (semiejes mayores $a > 2000$ UA). La muestra de cometas fue extraída del catálogo de Marsden & Williams (2008).

La nube de Oort se formó con aquellos planetesimales ricos en hielo que fueron desviados por las perturbaciones de los planetas gigantes hacia órbitas cuasiparabólicas (distancias $\gtrsim 10^4$ UA). A esas distancias están sujetos a las perturbaciones de estrellas cercanas (Oort 1950) y a la fuerza de marea del disco galáctico (p. ej. Torbett 1986), las cuales cambian esencialmente las distancias perihélicas y las inclinaciones de sus órbitas. Esto último explicaría porqué los cometas, aun habiéndose formado en el disco protoplanetario en órbitas de pequeñas inclinaciones, han adquirido con el tiempo una distribución espacial esférica en la nube de Oort.

Los astrónomos Kenneth E. Edgeworth y Gerard Kuiper también especularon que más allá de Neptuno debió permanecer un cinturón de numerosos objetos pequeños que, dadas las bajas densidades en esas distantes regiones, no pudieron aglomerarse en un planeta único (Edgeworth 1949; Kuiper 1951). Más adelante, el autor de esta nota (Fernández 1980) sugirió que objetos de ese cinturón, por entonces hipotético, eran la fuente de los CFJs. Finalmente, después de varios años de búsquedas infructuosas, en 1992 David Jewitt y Jane Luu descubrieron el primer objeto de ese cinturón, denominado 1992 QB$_1$ (Jewitt & Luu 1993). En la actualidad el número de objetos transneptunianos descubiertos sobrepasa el millar. En realidad, Plutón -descubierto en 1930- se considera hoy como el primer objeto descubierto de ese cinturón. De acuerdo a la nueva nomenclatura aprobada por la Asamblea General de la

Unión Astronómica Internacional en 2006, Plutón es definido como un 'planeta enano' o plutoide.

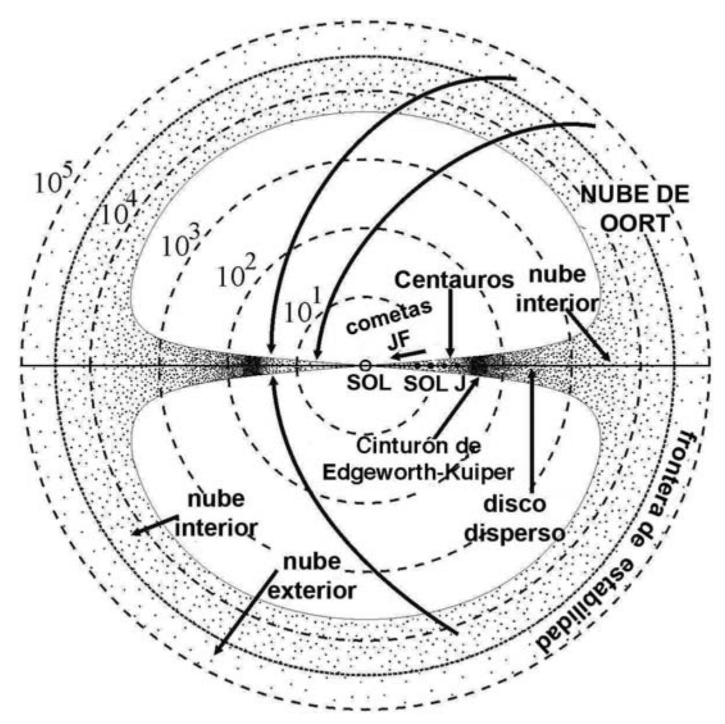


Fig. 7 - Esquema que muestra la distribución de las diferentes poblaciones de objetos ricos en hielos del Sistema Solar, yendo desde los cometas de la Familia de Júpiter, Centauros, objetos transneptunianos, hasta la nube de Oort. Las flechas curvadas representan la vía de ingreso a la región planetaria de cometas de la nube de Oort. Los círculos concéntricos punteados indican distancias en UA (Fernández 2005).

Las distintas poblaciones de pequeños cuerpos del Sistema Solar se muestran en Figura 7. Debido a las perturbaciones de estrellas cercanas y la fuerza de marea del disco galáctico, algunos cometas de la nube de Oort son inyectados en la región planetaria, pudiendo en ese caso ser detectados desde la Tierra. Como se ve en la figura, los cometas de las zonas exteriores de la nube de Oort pueden ser inyectados directamente en las vecindades del Sol donde pueden eventualmente ser detectados como nuevos. Las perturbaciones planetarias también pueden atraer algunos objetos del cinturón transneptuniano (o cinturón de Edgeworth-Kuiper) hacia la región planetaria. Mientras se encuentran en la región de los planetas gigantes, en su tránsito hacia la región planetaria interior, se denominan *Centauros*. Aquellos que finalmente llegan a las cercanías de Júpiter y son transferidos a la región planetaria interior pasan

a denominarse cometas de la Familia de Júpiter (Levison & Duncan 1997). En la región fuente (el cinturón transneptuniano) los objetos tiene bajas inclinaciones y esta propiedad se mantiene en los Centauros y CFJs.

4. El núcleo cometario

Los núcleos sólidos de la mayoría de los cometas observados tienen tamaños entre algunas décimas km y ~10 km. El material cometario parece ser muy poroso y frágil, como lo sugieren las frecuentes fragmentaciones observadas de núcleos cometarios. La densidad media estimada es de apenas 0,4 g cm^{-3} (Sosa & Fernández 2009). Es posible que en vez de un núcleo fuertemente consolidado, se tenga un aglomerado de partículas y fragmentos de distinto tamaño con muy poca cohesión interna, modelo denominado de “pila de escombros” (o “rubble pile”) (Weissman 1986) (Figura 8). La alta porosidad y débil consistencia sugieren que el material cometario nunca ha sido compactado por altas presiones ni cocinado en interiores calientes. Sin embargo, como veremos más adelante, la situación puede ser distinta en objetos más grandes.

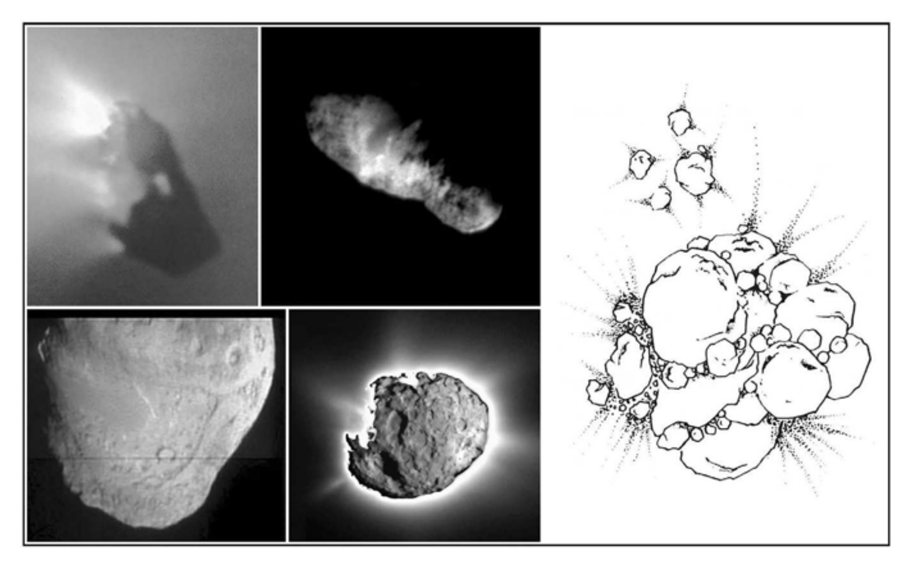


Fig. 8 - Imágenes de los cometas 1P/Halley (superior izquierda) (ESA/Max-Planck-Institut für Aeronomie), 19P/Borrelly (superior derecha) (NASA/JPL), 9P/Tempel 1 (inferior izquierda) (NASA/JPL) y 81P/Wild 2 (inferior derecha) (NASA/JPL), tomadas desde sondas espaciales a corta distancia. En el panel de la derecha se presenta el modelo del núcleo cometario de Weissman (1986) de la ’pila de escombros’ (’rubble-pile’).

4.1. Composición química

Las proporciones de los distintos elementos en el material cometario parecen ser similares a las del Sol, con las únicas excepciones del hidrógeno, helio y posiblemente neón, que están fuertemente empobrecidos en los cometas. Aún así, si bien el hidrógeno no está presente como elemento, lo está a través de diversos compuestos hidrogenados, el más abundante de los cuales es el agua. Otros compuestos ricos en los elementos químicamente activos más abundantes en el universo: C, H, O y N, son también abundantes en los cometas. Las proporciones de las distintas moléculas gaseosas observadas en las comas de los cometas se muestran en Tabla 2. En cantidades aun menores se detectaron otras moléculas de interés biológico: HNCO, HC_3N, OCS, H_2CS, NH_2CHO, HCOOH, $HCOOCH_3$, CH_3CHO, HNC, C_2H_2, C_2H_6.

Tabla 2 - Abundancias relativas de especies moleculares en cometas

Molécula	Fracción de masa
H_2O	~ 100
CO	~ 7-8
CO_2	~ 3
H_2CO (formaldehido)	~ 0-5
NH_3	~ 1-2
HCN	$\lesssim$ 0,02-0,1
CH_3OH (metanol)	~ 1-5

El agua y demás volátiles se encuentran congelados en el núcleo cometario mezclado con partículas de polvo constituidas por materiales refractarios como los silicatos, y compuestos orgánicos de los elementos C, H, O y N ("partículas CHON") no volátiles. Sólo cuando el cometa se acerca al Sol es que el agua y los volátiles se subliman arrastrando consigo las partículas de polvo. Una vez liberadas, estas partículas están sujetas a la presión de la radiación solar que las proyecta en la dirección opuesta al Sol dando forma a la cola de polvo. La radiación solar también ioniza las moléculas y los iones formados,

en particular los más abundantes CO^+ y N_2^+, son también proyectados en la dirección opuesta al Sol en este caso por el viento solar.

4.2. Contribución de material cometario a la masa de los planetas terrestres en sus últimas etapas de formación

Como dijimos anteriormente, los planetas gigantes recién formados dispersaron los objetos residuales de sus zonas de formación. Parte de esos objetos de naturaleza cometaria fueron a parar a la región de los planetas terrestres compuestos por material refractario (silicatos, óxidos metálicos, hierro, níquel), dotándolos de una capa exterior rica en agua y otras sustancias volátiles. En la Tabla 3 se muestran estimaciones de varios autores de la cantidad de material cometario que atrapó la Tierra primitiva y en qué período de tiempo.

Tabla 3 - Materia cometaria atrapada por la Tierra

Materia cometaria (g)	Tiempo (años)	Referencia
$2{,}0 \times 10^{14-18}$	$2{,}0 \times 10^9$	Oró (1961)
$1{,}0 \times 10^{25-26}$	Acreción tardía	Whipple (1976)
$3{,}5 \times 10^{21}$	Acreción tardía	Sill & Wilkening (1978)
$7{,}0 \times 10^{23}$	$4{,}5 \times 10^9$	Chang (1979)
$2{,}0 \times 10^{22}$	$4{,}5 \times 10^9$	Pollack & Yung (1980)
$1{,}0 \times 10^{23}$	$2{,}0 \times 10^9$	Oró et al. (1980)
$1{,}0 \times 10^{24-25}$	$1{,}0 \times 10^9$	Delsemme (1984, 1991)
$6{,}0 \times 10^{24-25}$	$1{,}0 \times 10^9$	Ip & Fernández (1988)
$1{,}0 \times 10^{23-26}$	$4{,}5 \times 10^9$	Chyba et al. (1990)
$3{,}0 \times 10^{24-25}$	algunos 10^8	Fernández & Ip (1997)
$4{,}5 \times 10^{24-25}$	algunos 10^7	Brunini & Fernández (1999)

(*) Los valores citados antes de 1997 fueron tomados de la Tabla de Oró & Lazcano (1997).

La mayoría de los resultados de Tabla 3 sugerirían que el material cometario proveniente de la región de los planetas gigantes fue suficiente como para abastecer a todos los océanos terrestres, más el agua contenida en la atmósfera, corteza y manto, estimada en $\sim 3 \times 10^{24}$ g. Yendo aun más lejos, podríamos especular que sin esta contribución la Tierra hubiera permanecido como un

objeto árido y sin vida. Sin embargo el cociente de isótopos de deuterio e hidrógeno (D/H) observado en 3 cometas mostró ser un factor ~2 mayor que el observado en los océanos terrestres (Figura 9), lo cual indica que los cometas no pudieron ser los contribuyentes principales.

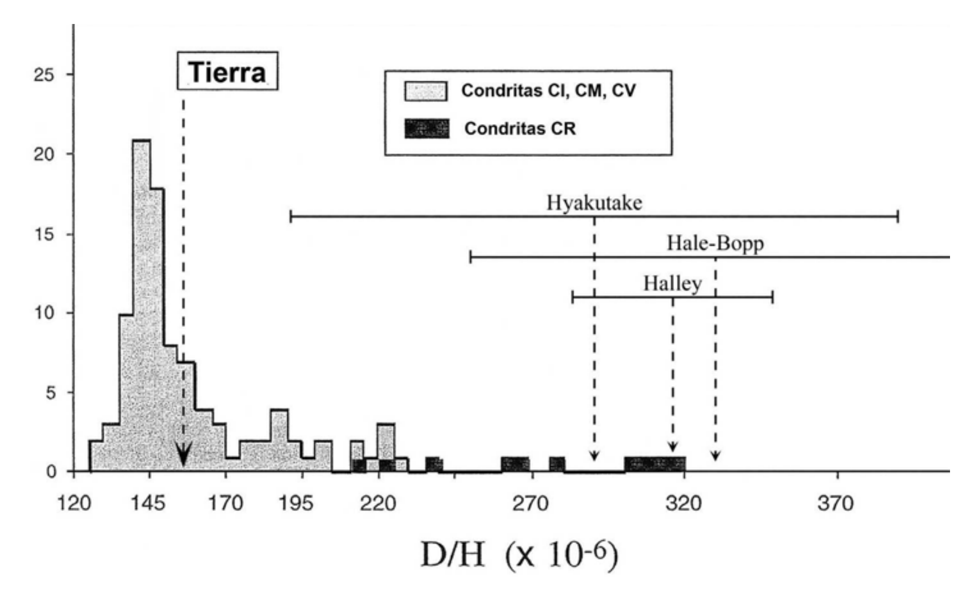


Fig. 9 - Distribucón del cociente de isótopos D/H en una muestra de meteoritos del tipo de las condritas carbonosas (tomado de Robert 2003). Se indican también los valores correspondientes al agua oceánica y los valores medidos en los cometas 1P/Halley, C/1995 O1 (Hale-Bopp) y C/1996 B2 (Hyakutake) (Fernández 2005).

Vemos también en la Figura 9 que hay una buena correspondencia del cociente D/H de los océanos terrestres con el observado en el tipo de meteoritos denominados condritas que provienen de cinturón de asteroides y corresponden a fragmentos producidos en colisiones mutuas de asteroides. El empobrecimiento en deuterio en el agua de las condritas se explicaría si el hielo en el disco protoplanetario hubiera pasado por fases de sublimación/recondensación, como presumiblemente fue el caso en la región del disco protoplanetario próximo a la línea de nieve donde se formaron las condritas (parte exterior del cinturón de asteroides). Las moléculas de agua sublimadas enriquecidas en deuterio (que responden a la fórmula HDO) en la fase gaseosa pueden intercambiar el deuterio con el hidrógeno nebular en moléculas de agua de esta manera (Delsemme 1999):

$HDO + H_2 \leftrightarrow H_2O + HD$

Es decir que quedará como producto moléculas de agua común e hidrógeno enriquecido en deuterio. El agua empobrecida en deuterio se recondensó o incorporó a las moléculas de los minerales formando silicatos hidratados. Con esta materia prima conteniendo agua empobrecida en deuterio se formaron los asteroides de la parte exterior del cinturón.

Por lo dicho antes, se puede presumir que la mayor parte del agua terrestre provino del material carbonoso hidratado, empobrecido en deuterio, del cinturón asteroidal exterior y, en una proporción menor, de los cometas (Morbidelli et al. 2000).

5. ¿Agua líquida en el interior de cuerpos ricos en hielo?

Como dijimos, los cometas parecen tener un material poroso poco o nada procesado, esto es por lo menos válido en los cometas observados que son objetos en general muy pequeños (diámetros típicos $\lesssim 10$ km). La pregunta es si en cometas más grandes, u otros objetos ricos en hielo como los objetos transneptunianos, o los satélites mayores de los planetas gigantes, no pudieron alcanzarse las temperaturas y presiones suficientes para el derretimiento del hielo interior generando un medio acuático (Figura 10). La fuente de energía primordial pudo haber sido el decaimiento de algún radioisótopo de corta vida como el ^{26}Al, presente en el disco protoplanetario, que decae en ^{26}Mg en apenas $7{,}4 \times 10^5$ años. Si Q es la tasa de producción de energía, el calor producido a una distancia r del centro del núcleo elevará la temperatura con respecto a la de la superficie por una cantidad dada por:

$$T(r) \simeq T_S + \frac{\bar{Q}\rho}{6K}(R_N^2 - r^2) \tag{3}$$

donde R_N es el radio del núcleo cometario, ρ su densidad y K la conductividad térmica del material.

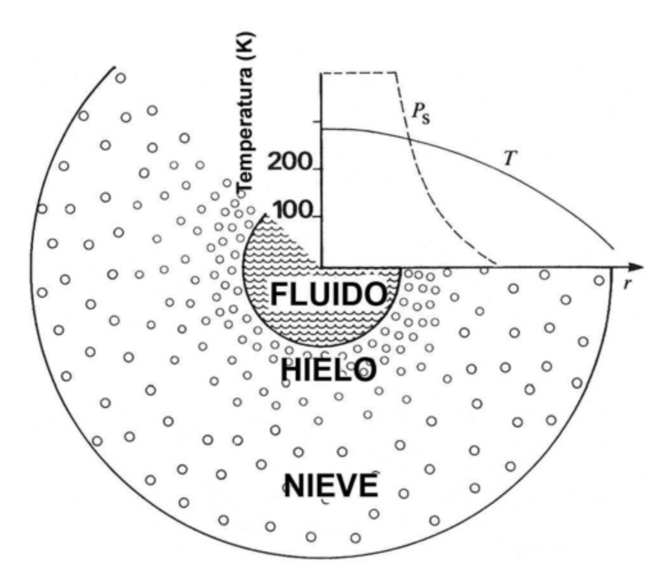


Fig. 10 - Hipotético núcleo de agua líquida de un núcleo cometario. Se grafican también la presión de vapor P_S y la temperatura T computadas en función de la distancia r al centro (Wallis 1980).

Considerando valores apropiados para los diversos parámetros físicos de ec.(3), Wallis (1980) concluye que un cometa de radio $R_N \cong 10$ km pudo haber alcanzado en el interior las temperaturas y presiones necesarias para fundir el hielo. Sin embargo, Podolak & Prialnik (1997) consideran que la conductividad que adoptó Wallis, correspondiente al hielo amorfo y poroso, es demasiado pequeña. De acuerdo a estos autores, un incremento de temperatura en el interior del núcleo llevaría a un cambio de fase del hielo amorfo a cristalino con el consiguiente aumento de la conductividad térmica. Por consiguiente, al difundirse más eficientemente el calor hacia el exterior, nunca se lograron las temperaturas suficientes para derretir el hielo en el interior del núcleo cometario.

El análisis anterior parece descartar la existencia pasada o presente de ambientes de agua líquida en el interior de pequeños cometas. Sin embargo, la situación puede haber sido distinta en objetos ricos en hielo más grandes, digamos del orden de varios centenares de km de diámetro. Estos objetos son muy abundantes en el cinturón transneptuniano, y hay incluso varios satélites de planetas gigantes de estas características. Como veremos a continuación,

estos últimos tienen una fuente de energía adicional que es la proveniente de las mareas que levantan el planeta central y otros satélites.

5.1. ¿Océanos subterráneos en Europa?

Si la presencia pasada o presente de agua líquida en cometas gigantes o 'planetas enanos' no pasa por el momento de una mera especulación teórica, en objetos como los satélites de Júpiter, Europa y Ganímedes, las evidencias observacionales sugieren fuertemente la existencia de un océano interior, especialmente en el caso de Europa cuyo diámetro es de 3140 km (algo menor que el de la Luna). En efecto su superficie aparece como extremadamente lisa, con pocos cráteres de impacto como ha sido develado por las impresionantes imágenes de la sonda espacial Galileo de la NASA (Figura 11), lo que indica que las huellas de pasadas colisiones han sido borradas al reciclarse la superficie. Ya que carece de agentes erosionantes como agua superficial o atmósfera, la única forma de explicar la renovación de su superficie es por criovulcanismo, es decir derrames de un líquido interior a baja temperatura. El único candidato obvio es el agua. Debemos notar, no obstante, que el derrame podría ser de hielo calentado que fluye por convección en estado de plasticidad pero sin llegar a derretirse. Es interesante observar en la superficie de Europa grietas que entretejen su superficie por donde fluye el material desde el interior hacia la superficie. La fuente de calor que mantiene la actividad en Europa son las mareas levantadas por Júpiter y por lo otros satélites mayores del planeta que deforman el material interior de Europa produciendo fricción interna que genera calor.

5.2. ¿Océanos subterráneos en Encelado?

Un descubrimiento sorprendente de la sonda espacial Cassini es la presencia de actividad en el diminuto satélite de Saturno Encelado (diámetro ~500 km). Efectivamente, se han observado géiseres en donde el material eyectado a cientos de km de altura consiste de partículas de hielo, vapor de agua y otros gases como $CO_{2,}$ $N_{2,}$ CH_4, $NH_{3,}$ acetileno y propano (Figura 12). La superficie de Encelado se asemeja mucho a la de Europa. Es muy lisa, con pocos cráteres y con extensas grietas lo que refleja una continua remodelación por el material que fluye desde el interior.

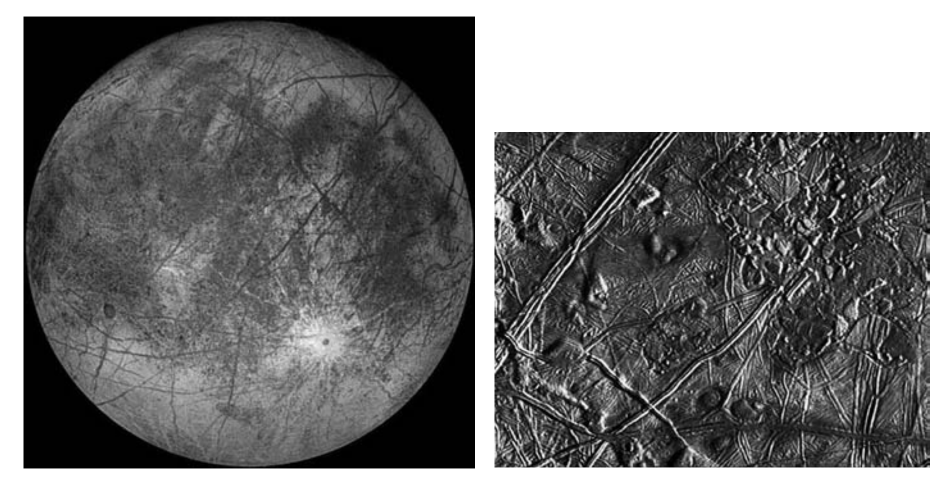


Fig. 11 - La superficie de Europa es lisa, con pocos cráteres y un extenso entretejido de fracturas (izquierda). Imagen ampliada de una región de 100km × 140km de Europa que sugiere fenómenos de criovolcanismo (derecha) (Fuente:NASA).

Como en el caso de Europa, la fuente de calor interna que mantiene esta actividad es la fricción del material interno por las mareas levantadas por Saturno y por el vecino satélite Dione cuyo efecto se refuerza por encontrarse en la resonancia 2:1 con Encelado (es decir, por cada 2 revoluciones de Encelado, Dione completa una). Es también posible que este calor haya derretido el hielo interior manteniendo un océano subterráneo en Encelado.

6. El futuro cercano: nuevas misiones espaciales

Ya hemos aprendido mucho acerca de la composición química y la estructura física de los cometas, pero aun nos falta un buen camino por recorrer para conocer cabalmente su naturaleza y su posible relevancia para la vida. Jugará un papel clave para este objetivo la exploración in situ de algunos de estos objetos, como es el caso de la misión Rosetta de la Agencia Espacial Europea (ESA) que tiene previsto un encuentro tipo rendezvous (a baja velocidad) con el cometa de la familia de Júpiter 67P/Churyumov-Gerasimenko en mayo/2014. Al cabo de una larga travesía que comenzó en 2004, la sonda espacial se colocará en órbita en torno al cometa para obtener mapas detallados de su superficie, y de la nave madre descenderá un pequeño módulo, llamado Philae, para extraer muestras del suelo. La sonda continuará en órbita

en torno al cometa hasta un poco después de su pasaje por el perihelio, dando fin a la misión en diciembre/2015. Por primera vez tendremos un inventario completo de las sustancias presentes en la superficie del cometa, incluyendo por supuesto las moléculas orgánicas.

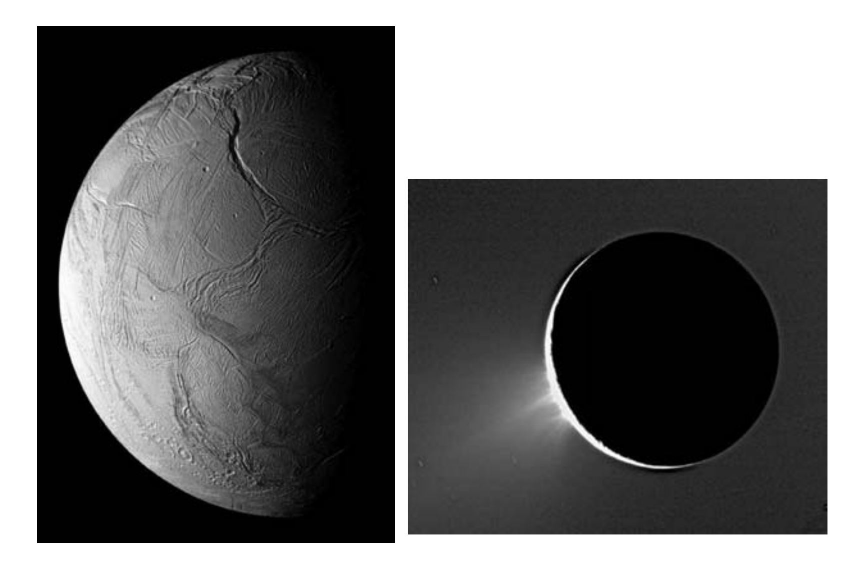


Fig. 12 - La superficie de Encelado muestra pocos cráteres y extensas grietas (derecha). Se ha detectado actividad en forma de emisión de gases (derecha) (Fuente: NASA).

En el futuro habrá seguramente misiones espaciales a los objetos que se sospechan que tengan océanos subterráneos, empezando por Europa y Encelado. Está planteada una misión internacional para el 2020, denominada Europa Jupiter System Mission (EJSM) en la cual participarían las mayores agencias espaciales (NASA de EEUU, ESA de Europa, JAXA de Japón y FKA de Rusia). La misión se enfocaría en el estudio de Europa y Ganímedes y la existencia de océanos subterráneos. La posibilidad de explorar esos océanos dependerá no sólo de que efectivamente existan, sino además de que estén lo suficientemente cerca de la superficie para que sea técnicamente viable perforar la corteza hasta alcanzarlos.

Sin duda, aún nos queda mucho para explorar antes de poder concluir si la vida se desarrolló en el Sistema Solar en otro lugar que no sea la Tierra. Cometas gigantes u objetos transneptunianos $\gtrsim$ 100 km pueden ser objetos interesantes para buscar huellas de antiguos océanos que se volvieron a congelar

una vez que la fuente de energía se agotó. Se podría ir más lejos y especular si objetos aún mayores (diámetros $\gtrsim$ 1000 km), los denominados 'planetas enanos' como Plutón, Eris. Makemake o Haumea, no podrían haber preservado en su interior agua líquida hasta el presente.



Fig. 13 - Impresión artística que muestra al módulo de descenso Philae posando en la superficie del núcleo (derecha) (Fuente: ESA).

Tendremos que esperar a futuras misiones espaciales, como la *New Horizons* de la NASA prevista para sobrevolar Plutón en 2015 a menos de 10000 km de su superficie, para tratar de responder esta interrogante. Ya que la vida está íntimamente asociada a la presencia de agua líquida, no se puede entonces ignorar la relevancia de encontrar en otros cuerpos del Sistema Solar, fuera de la Tierra, agua líquida en forma estable, no en la superficie como en nuestro planeta, sino en capas subterráneas.

7. Ejercicios

- ¿De qué forma la presencia de una población de cometas y otros objetos ricos en hielos puede afectar la discusión del concepto de "zona habitable" alrededor de un sistema planetario?
- ¿Qué requisitos deberían cumplirse para que otras estrellas estuvieran rodeadas de nubes de cometas orbitando a grandes distancias formando una estructura del tipo de nube de Oort?

Referencias

Bailey, M.E., Clube, S.V.M. y Napier, W. M. *The Origin of Comets*, Oxford, England, Pergamon, 1990.

Beckwith, S.V.W. y Sargent, A.I. The occurrence and properties of disks around young stars en *Protostars and Planets III,* E.H. Levy y J.I. Lunine, eds., Tucson, Univ. Arizona Press, pp. 521-542, 1993.

Blitz, L. Giant molecular clouds en *Protostars and Planets III,* E.H. Levy y J.I. Lunine, eds., Tucson, Univ. Arizona Press, pp. 125-162, 1993.

Brunini, A. y Fernández ,J.A. Numerical simulations of the accretion of Uranus and Neptune, *Planetary and Space Science,* vol. 47: 591-605, 1999.

Chang, S. Comets: Cosmic connections with carbonaceous meteorites, interstellar molecules and the origin of life en *Space Missions to Comets,* M. Neugebauer, D.K. Yeomans, J.C. Brandt y R.W. Hobbs, eds., Washington, DC., NASA CP 2089, pp. 59-111, 1979.

Chyba, C. F. The cometary contribution to the oceans of the primitive Earth, *Nature,* vol. 330: 632-635, 1987.

Chyba, C. F., Thomas, P. J., Brookshaw, L. y Sagan, C. Cometary delivery of organic molecules to the early Earth, *Science,* vol. 249: 366-373, 1990.

Delsemme, A. H. The cometary connection with periodic chemistry, *Origins Life,* vol. 14: 51-60, 1984.

Delsemme, A. H. Nature and history of the organic componds in comets: An astrophysical view en *Comets in the Post-Halley Era,* R.L. Newburn Jr., M. Neugebauer y J. Rahe, eds., Dordrecht, Kluwer, pp. 377-427, 1991.

Delsemme, A. H. The deuterium enrichment observed in recent comets is consistent with the cometary origin of seawater, *Planetary and Space Science,* vol 47: 125-131, 1999.

Edgeworth, K. E. The origin and evolution of the solar system, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 109: 600-609, 1949.

Fernández, J. A. On the existence of a comet belt beyond Neptune, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 192: 481-491, 1980.

Fernández, J. A. *Comets. Nature, Dynamics, Origin, and their Cosmogonical Relevance*, Dordrecht, Springer-Verlag, 2005.

Fernández, J. A. y Ip, W. H. Accretion of the outer planets and its influence on the surface impact process of the terrestrial planets en *Astronomical and Biochemical Origins and*

the Search for Life in the Universe, C.B. Cosmovici, S. Bowyer y D. Werthimer, eds., Bologna, Editrice Compositori, pp. 235-244, 1997.

Hollenbach, D. J., Yorke, H. W. y Johnstone, D. Disk dispersal around young stars en *Protostars and Planets IV,* V. Mannings, A.P. Boss y S.S. Russell, eds., Tucson, Univ. Arizona Press, pp. 401-428, 2000.

Ip, W.-H. y Fernández, J. A. Exchange of condensed matter among the outer and terrestrial protoplanets and the effect on surface impact and atmospheric accretion, *Icarus,* vol. 74: 47-61, 1988.

Jewitt ,D. y Luu, J. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1, *Nature,* vol. 362: 730-732, 1993.

Kuiper, G. B. On the origin of the solar system en *Astrophysics,* J.A. Hynek, ed., McGraw-Hill, pp. 357-424, 1951.

Levison, H. F. y Duncan, M. J. From the Kuiper belt to Jupiter-family comets: The spatial distribution of ecliptic comets, *Icarus,* vol. 127: 13-32, 1997.

Marsden, B. G. y Williams, G. V. *Catalogue of Cometary Orbits*, 17th Edition, IAU, Minor Planet Center, CBAT, 2008.

McCaughrean, M. J. y O'Dell, C. R. Direct imaging of circumstellar disks in the Orion nebula, *Astronomy Journal,* vol. 111: 1977-1986, 1996.

Morbidelli, A., Chambers, J., Lunine, J. I., Petit, J. M., Robert, F., Valsecchi, G. B. y Cyr, K.E. Source regions and timescales for the delivery of water to the Earth, *Meteoritics and Planetary Science,* vol. 35: 1309-1320, 2000.

Oort, J. H. The structure of the cloud of comets surrounding the solar system and a hypothesis concerning its origin, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands,* vol. 11: 91-110, 1950.

Oró, J. Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth, *Nature,* vol. 190: 389-390, 1961.

Oró, J. y Lazcano, A. Comets and the origin and evolution of life en *Comets and the Origin and Evolution of Life,* P.J. Thomas, C.F. Chyba y C.P. McKay, eds., New York, Springer, pp. 3-27, 1997.

Oró, J., Holzer, G. y Lazcano-Araujo, A. The contribution of cometary volatiles to the primitive Earth, *Life Sciences and Space Research XVIII* 67-82, 1980.

Podolak, M. y Prialnik, D. ^{26}Al and liquid water environments in comets en *Comets and the Origin and Evolution of Life,* P.J. Thomas, C.F. Chyba y C.P. McKay, eds., New York, Springer, pp. 259-272, 1997.

Pollack, J. P. y Yung, Y.L. Origin and evolution of planetary atmospheres, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences,* vol. 8: 425-487, 1980.

Robert, F. The D/H ratio in chondrites, *Space Science Reviews* vol. 106: 87-101, 2003.

Schidlowski, M. A 3,800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks, *Nature,* vol. 333: 313-318, 1988.

Sill, G. T. y Wilkening, L. L. Ice clathrate as a possible source of the atmospheres of the terrestrial planets, *Icarus,* vol. 33: 13-22, 1978.

Sosa, A. y Fernández, J. A. Cometary masses derived from non-gravitational forces, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 393: 192-214, 2009.

Torbett, M. V. Injection of Oort cloud comets to the inner solar system by galactic tidal fields, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,* vol. 223: 885-895, 1986.

Wallis, M. K. Radiogenic heating of primordial comet interiors, *Nature,* vol. 284: 431-433, 1980.

Weissman, P. R. Are cometary nuclei primordial rubble piles?, *Nature,* vol. 320: 242-244, 1986.

Whipple, F. L. A speculation about comets and the Earth, *Memoires de la Societé Royale des Sciences de Liège,* vol. 9: 101-111, 1976.

Yeomans, D. K. *Comets: A Chronological History of Observation, Science, Myth, and Folklore*, New York, Wiley, 1991.

Capítulo 7

El rol de los impactos en la historia del Sistema Solar

Gonzalo Tancredi

Resumen Desde la etapa temprana de formación del Sistema Solar hasta el presente los impactos entre sus componentes han jugado un rol importante. Se analizará la relevancia de los impactos en diversas etapas de la evolución de nuestro sistema planetario, con especial énfasis en las consecuencias que han tenido para nuestro planeta; como ser:

- Acreción de planetesimales para la formación de la Tierra y la Luna.
- El bombardeo tardío.
- Los mega-impactos y las extinciones masivas.
- La frecuencia de impactos en el presente: sus consecuencias, prevención y mitigación.

Abstract Since the early formation of the Solar System and up to the present, the impacts among its components have played an important role. The relevance of the impacts in different stages of the evolution of our planetary system will be analysed, with special emphasis in the consequences they have brought to our planet, such as:

- Accretion of planetesimals for the formation of the Earth and the Moon
- The late bombardment
- The mega-impacts and mass extinctions
- The frequency of impacts in the present: their consequences, prevention and mitigation.

Gonzalo Tancredi (✉)

Departamento de Astronomía, Facultad de Ciencias (UDELAR), Iguá 4225, 11400 Montevideo, Uruguay Observatorio Astronómico Los Molinos – DICYT - MEC

gonzalo@fisica.edu.uy

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 147 - 176, © 2010 UNESCO-Montevideo.

1. La mecánica de los impactos

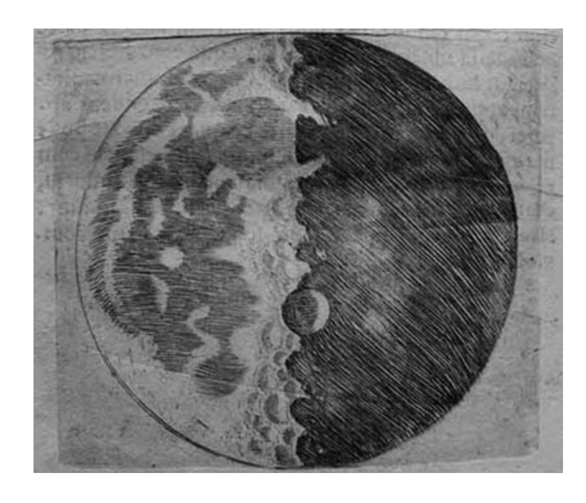


Fig. 1 - Copia de una página del libro *Siderius Nuncius* de Galileo Galilei donde se muestran dibujos de cráteres lunares.

El estudio de los cráteres de impacto tiene un inicio bien definido: el año 1610, cuando Galileo Galilei hace las primeras observaciones telescópicas de la Luna e identifica la presencia de depresiones circulares en la superficie. La Figura 1 es copia de una página del libro *Siderius Nuncius*, donde sobre el terminador se observa una depresión con borde elevado, para la que Galileo pudo estimar su altura.

Las primeras consideraciones sobre el origen de los cráteres lunares fueron hechas por R. Hooke en 1665, que llegó a especular sobre el origen de impacto de los mismos, por la analogía con la observación de proyectiles impactando arcilla; pero desestimó dicha hipótesis en base a la falta de objetos en el espacio que pudieran producir dicha colisión.

El primer análisis comparativo de cráteres terrestres y lunares fue hecho por J. H. Schröter en 1791. A falta de hipótesis alternativas plausibles, Schröter concluyó que los cráteres lunares, al igual que los terrestres conocidos a la fecha, debían tener un origen volcánico.

En 1893, el geólogo G. K. Gilbert, a partir de la caracterización de los cráteres lunares y de su clasificación morfológica, concluyó que los cráteres

debían ser producto de la colisiones. Gilbert estableció la siguiente progresión morfológica de tamaño de los cráteres:

- Cráteres pequeños con forma de tazones simples
- Cráteres con pico central y terrazas
- Cráteres de diferentes edades: frescos con bordes pronunciados, viejos y degradados

Si bien Gilbert analizó el famoso cráter Meteor de Arizona, concluyó que debía tener un origen volcánico. No fue hasta 1906 que M. Barringer presentó fuertes argumentos a favor del origen de impacto de este cráter. Se trató pues del primer cráter de impacto reconocido en la Tierra. El interés de Barringer en relación al cráter fue económico, ya que consideró que debería haber una gigantesca masa de hierro proveniente del meteorito enterrada bajo el suelo. Invirtió grandes sumas en la prospección al interior del cráter sin ningún éxito. A partir de consideraciones físicas relativas a la mecánica del impacto, se comenzó a reconocer que los proyectiles necesarios para producir un cráter son mucho menores que el volumen de material del blanco expulsado y que las altas temperaturas generadas en el momento impacto, vaporizarían la mayor parte del material del proyectil.

A principios del siglo XX, varios investigadores concluyeron que un impacto de alta velocidad se asemeja a una explosión (entre otros Öpik 1916). Esto significó un paso muy importante para el entendimiento de la mecánica de los impactos, ya que los resultados experimentales desarrollados principalmente a nivel militar podían ser aplicados al estudio de la formación de cráteres de impacto.

La energía del impacto es equivalente a la energía cinética del proyectil en el instante de la colisión. Para un proyectil de masa *m*, radio *r* y densidad ρ, impactando a una velocidad *v*, se puede calcular como

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{2\pi}{3} \rho r^3 v^2$$

Si las unidades son en el sistema mks, la energía estará dada en Joules. Pero en base a la analogía con los procesos explosivos, se usa como unidad de energía las toneladas de TNT, cuya equivalencia es: 1 ton TNT = 4,18 x 10^9 Joules.

La velocidad de impacto mínima, despreciando el efecto de frenado de la atmósfera, se corresponde con la velocidad de escape en la superficie del planeta; para el caso de la Tierra es de 11 km/s. A esto se debe sumar la velocidad relativa orbital del proyectil respecto al planeta. La máxima velocidad que pueda alcanzar un proyectil impactando en la Tierra corresponde a un cometa de largo período cuya órbita heliocéntrica es parabólica y retrógrada; la velocidad de impacto sería de 78 km/s, o sea una energía 50 veces superior que la correspondiente a la velocidad de impacto mínima. Los asteroides en órbitas que se acercan a la Tierra (Near-Earth Asteroids – NEAs) tienen velocidades de impacto típicamente en el rango de 12 a 25 km/s; mientras que las velocidades de los cometas son generalmente superiores. Un asteroide rocoso de 1 km de diámetro a una velocidad de 12 km/s depositaría una energía de ~ 10^{20} J, lo que equivale a ~20,000 Mega-tons de TNT. Como comparación la mayor bomba atómica que se ha detonado tuvo una energía de ~50 Mega-tons (URSS, 1961). El reciente terremoto ocurrido en Maule, Chile (27 de Febrero 2010), de 8,8 en la escala Richter, liberó una energía de ~200 Mega-tons de TNT.

Sobre la segunda mitad del siglo XX, un nuevo avance significativo representó la observación cercana de la superficie de otros miembros del Sistema Solar, a través de sondas espaciales: Marte y sus satélites, satélites de los planetas gigantes, Mercurio, Venus y finalmente varios asteroides y cometas. Todas las superficies muestran huellas de impacto, siendo la craterización el principal proceso geológico común que experimentan todos los cuerpos de los sistemas planetarios.

A partir del análisis comparativo de las estructuras de impacto en las superficies planetarias, incluyendo los micro-impactos registrados en las superficies de satélites artificiales, se puede elaborar la siguiente secuencia morfológica de cráteres según su tamaño (ver Figura 2):

Hoyo de impacto → Cráter Simple tipo tazón → Cráter con pico central → Cráter con anillo central → Cuenca de impacto con multi-anillos

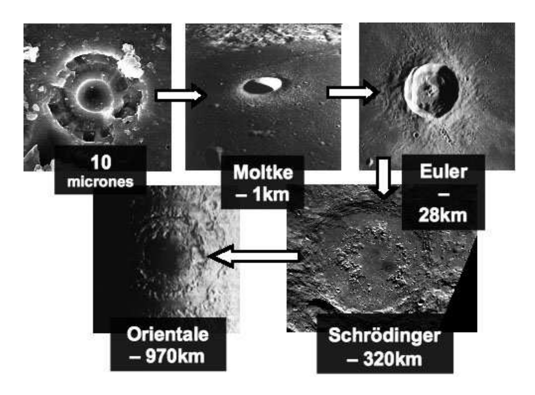


Fig. 2 - Secuencia de estructuras de impacto

En la Tabla 1 se comparan diversos parámetros relativos a las tres estructuras de impacto más relevantes en el Sistema Solar.

Tabla 1 - Diferencias entre la morfología de los tres principalels tipos de cráteres: simples, complejos y con anillo central

Tipo	Simples	Complejos	Anillo central
Forma	Forma de tazón	Fondo del cráter plano. Pico central. Paredes en terrazas	Fondo del cráter plano. Anillo central. Paredes en terrazas
Material	Poco material fundido	Algo de material fundido	Mayor proporción de material fundido
Razón profundidad / diámetro (d/D)	d/D ~ 0,2	d/D mucho menor y dependiente del diámetro	d/D ~ 0. Anillo central de diámetro mitad del cráter
Tamaño	Pequeños cráteres	Grandes cráteres	Muy grandes cráteres
Tamaño para el caso de impacto en la Luna	< 15km	30-200 km	> 300km

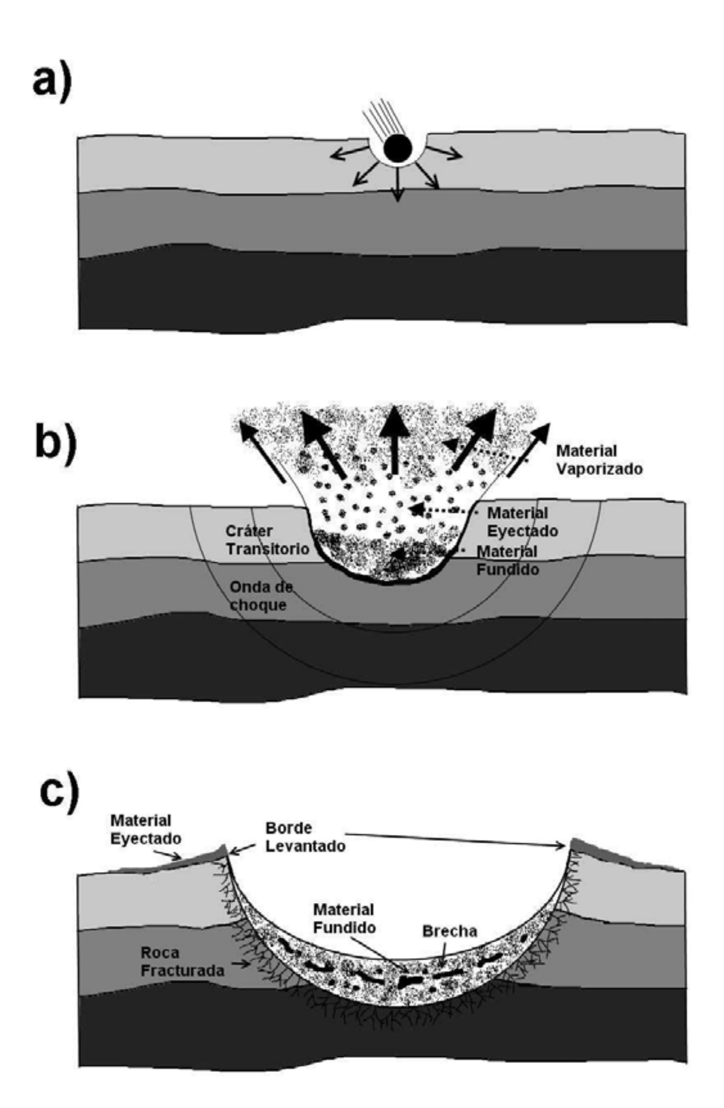


Fig. 3 - Etapas en la formación de un cráter simple. Serie de diagramas de secciones de corte mostrando el desarrollo progresivo de un cráter simple con forma de tazón formado en un blanco estructurado en capas horizontales (adaptado de French 1998).

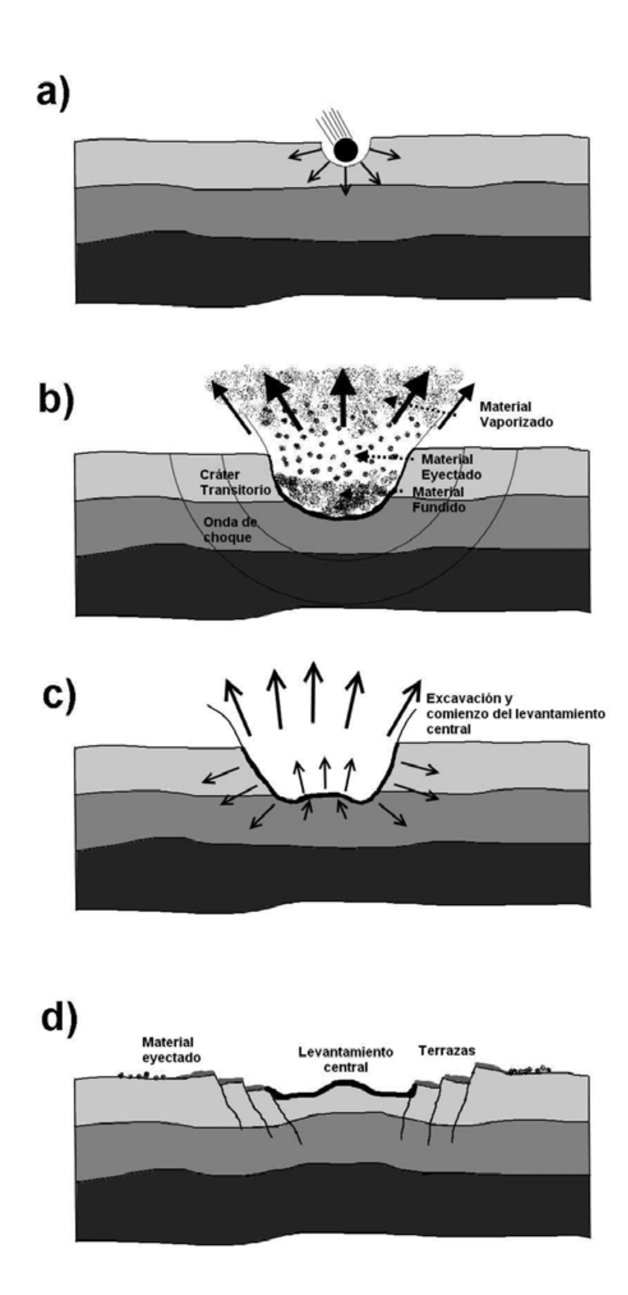


Fig. 4 - Etapas en la formación de un cráter complejo. Serie de diagramas de secciones de corte mostrando el desarrollo progresivo de un cráter complejo con pico central en un blanco estructurado en capas horizontales. Nótese que las etapas a) y b) hasta la formación del cráter transitorio son comunes a los cráteres simples y complejos. (adaptado de French 1998).

A continuación se listan algunas características comunes a los diferentes cráteres de impacto:

- El proceso de formación de un cráter se asemeja al de una explosión subterránea de poca profundidad, como es el caso de test nucleares. Los cráteres son el producto de explosiones de fuentes puntuales.
- Los impactos oblicuos forman cráteres circulares, aún con ángulos de impacto hasta de 15º con el plano horizontal.
- El borde del cráter, si no esta muy erosionado, se presenta levantado respecto al terreno y tiene una estratigrafía inversa respecto al subsuelo circundante.
- En cráteres jóvenes, se puede observar un manto de eyecta que se extiende en forma continua hasta aproximadamente un radio del cráter.
- El piso del cráter está constituido por rocas pulverizadas que forman un material tipo brecha (*breccia*), formado por una mezcla de diferentes rocas del lugar.
- Los minerales del cráter presentan rastros de haber sufrido procesos de metamorfismo de choque o impacto, caracterizado por las altas presiones y temperaturas experimentadas en un corto lapso de tiempo. Los minerales de cuarzo sometidos a condiciones de presión superior a algunos GPa comienzan a sufrir transformaciones estructurales donde aparecen minerales como la Coesita y la Shistovita, y estructuras con deformaciones planares (Planar Deformation Features – PDFs).
- El pasaje de las ondas de choque a través de la roca forma estructuras de forma cónica (*shatter cones*), con huellas que salen radiantes desde el vértice del cono. Pueden tener tamaños de cm a varios m.
- En las inmediaciones del cráter y aún a grandes distancias (dependiendo del tamaño del cráter) se pueden encontrar pequeñas piezas de aspecto tipo gota de un material de vidrioso, denominadas tectitas.

El proceso de formación de la estructura del cráter de impacto se puede dividir en tres etapas (ver Figuras 3 y 4):

1. Contacto del proyectil con la superficie y compresión de los materiales
2. Excavación del cráter, donde se dan los procesos de eyección de material, fundido de la roca, metamorfismo de choque y fracturación de la roca bajo el lugar de impacto. Nótese que estas dos etapas, hasta la formación del cráter transitorio, son comunes a los crátreres simples y complejos (Figuras 3 y 4 a y b).

3. Modificación y colapso del cráter. Se completa la caída del material eyectado, parte del material vuelve a caer hacia el interior del cráter. Dependiendo del tamaño del cráter y de la gravedad local se produce un rebote elástico que lleva a la formación del pico central o anillos en grandes cráteres. Se pueden formar hasta cráteres secundarios como producto de la caída de grandes piezas de material eyectado.

Otro proceso a considerar como consecuencia de un impacto es la generación de ondas sísmicas. Al igual que en los terremotos, los impactos generan ondas de cuerpo y superficiales, que viajan a través del interior del planeta. En mega-impactos las ondas pueden viajar a través de todo el planeta y producirse el efecto de enfocamiento de ondas en las antípodas del punto de impacto. Lo que puede generar importantes distorsiones en el terreno y, se ha especulado que puede producir, la aparición de flujos de magma. Mercurio presenta una gigantesca cuenca de impacto de más de 1500 km de diámetro, la cuenca *Caloris*. En las antípodas se ubica una amplia zona de terreno con surcos y elevaciones de apariencia desordenada, conocido como Terreno Caótico. En Marte hay evidencias de que en las antípodas de grandes cráteres como *Hellas Planitia* se ubican volcanes de grandes proporciones como *Alba Mons*.

En el caso de pequeños cuerpos, como asteroides y cometas, las consecuencias de reiterados impactos pueden ser varias, en orden creciente de energía del proyectil:

- Pequeños hoyos y cráteres que pulverizan el material de la superficie, produciendo una fina capa de polvo denominada regolito.
- Impactos que produce grietas y la fracturación del interior del objeto, pudiendo afectar a todo el cuerpo.
- Fragmentación total del cuerpo y reacumulación de la mayor parte de la masa original.
- Colisión catastrófica disruptiva, cuando el mayor fragmento no alcanza el 50% de la masa original del cuerpo blanco.

Por tanto, podremos encontrar dentro de la población de asteroides objetos con una variedad de estructuras internas como ser (Figura 5):

- Objetos monolíticos con cráteres en su superficie
- Objetos con grandes fracturas internas
- Objetos reacumulados como “pilas de escombros” (*rubble piles*), formado por piezas de cientos de m a km

- Objetos aglomerados de piezas más pequeñas de tan solo unos pocos m o menores *(pile of sand)*. El caso del asteroide Itokawa, visitado por la sonda Hayabusa, podría ser un ejemplo de este tipo.

Luego de esta revisión sobre la mecánica de impactos, se analizará algunos eventos en la historia del Sistema Solar donde los impactos han jugado un rol relevante.

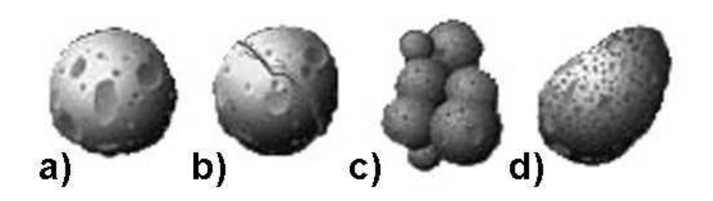


Fig. 5 - Modelos de estructura interna de asteroides: a) Sólido con cráteres superficiales; b) Sólido con grandes fracturas internas; c) Pila de escombros cubierta por polvo; d) Aglomerado de pequeñas rocas.

2. La formación de la Tierra y la Luna

Al momento de plantearse las hipótesis sobre el origen de la Luna, debemos tomar en cuenta una serie de datos relevantes sobre nuestro satélite; a saber:

- La Tierra tiene un núcleo de hierro grande, pero la Luna no.
- La Tierra tiene un densidad de 5,5 gr/cm^3, pero la densidad de la Luna es 3,3 gr/cm^3.
- La Luna tiene la misma razón de isótopos de Oxígeno que la Tierra; mientras que las rocas de Marte y los meteoritos provenientes de otras partes del Sistema Solar tienen una razón de isótopos de Oxígeno diferente.
- La razón (masa del satélite)/(masa del planeta) es la mas alta del Sistema Solar.
- El sistema Tierra-Luna presenta un alto valor de momento angular.

Se han manejado diversas hipótesis sobre el origen de la Luna. Pasamos a describir las hipótesis más relevantes con los problemas que cada una presenta:

- Fisión de una proto-Tierra en rápida rotación
  Problemas: no hay evidencia de rotación rápida; la órbita de la Luna no está en el plano ecuatorial de la Tierra.
- Captura de la Luna que se formó en otra parte del Sistema Solar
  Problemas: la similitud isotópica no es compatible con regiones de formación diferentes; es difícil alcanzar la presente órbita estable a partir de la captura.
- Condensación simultánea con la Tierra
  Problema: diferencia de composición química entre Tierra y Luna
- Gigantesco impacto: impacto de una proto-Tierra con un embrión planetario (Hartmann and Davis, 1975) (ver esquema de la Fig. 6).
- La colisión ocurrió luego de la diferenciación del interior de la Tierra, lo que explica las diferencias en la composición química entre la Tierra y la Luna. El impacto calentó el material suficiente para fundirlo, lo que es consistente con un "mar de magma" que fue el material que acretó para formar la Luna. La colisión no fue de frente, generando el alto momento angular del sistema Tierra-Luna. Canup (2004) ha logrado simular numéricamente el proceso de origen de la Luna, usando los siguientes parámetros para el modelo:

  - Impacto con un ángulo ~ 45º
  - Velocidad del impactor menor a 4 km/s
  - Masa del impactor entre 0,11 a 0,14 masas de la Tierra
  - 95% masa de la Tierra volvió a acretarse luego del impacto
  - La mayor parte de la masa de la Luna proviene del impactor

3. El bombardeo tardío intenso

La superficie de la Luna presenta dos tipos de terrenos dramáticamente diferentes (Figura 7):

- Zonas altas y claras, con terrenos montañosos y repletos de cráteres. Son denominados *Terra* (plural de *Terrae*)
- Zonas bajas y oscuras, del orden de ~ 3 km más bajas que las zonas altas; las superficies son más suaves. Son denominadas *Maria* (plural de *Mare*). Son cuencas inundadas de flujos de lava, compuesta por basaltos volcánicos. Las Maria tiene ~200 veces menos cráteres que las zonas altas.



Fig. 6 - Esquema de la formación del sistema Tierra-Luna a partir de la colisión de un planetesimal del tamaño de Marte con la proto-Tierra.

La formación de las Maria se explica como producto de gigantescos impactos que quebraron la corteza y produjeron grandes cuencas que fueron inundadas por lava.

Un avance importante para la caracterización de los dos tipos de zonas significó la toma de muestras por las misiones Apollo. Se analizaron rocas de los dos tipos de terrenos. El análisis radioactivo de las rocas mostró que las Maria tienen edades entre 3,1-3,8 Ga (giga-años; 1 Ga = $1x10^9$ años) y los Terra edades entre 3,8-4,0 Ga.

Otra pieza de información han sido los meteoritos lunares recolectados en la Tierra. Las edades obtenidas confirman que estos valores son representativos de la mayor parte de la Luna.

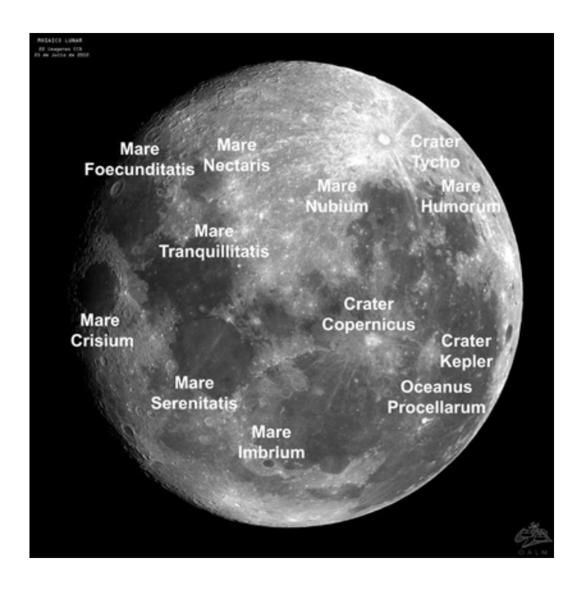


Fig.7 - Fotografía de la cara visible de la Luna donde se muestran las zonas altas y claras (Terrae) y las zonas bajas y oscuras (Mare). Imagen cortesía de S. Roland tomada desde el Observatorio Astronómico Los Molinos (Montevideo, Uruguay)

El conteo de cráteres permite establecer además edades relativas entre diversas regiones de la superficie lunar, lo que luego se puede transformar en edades absolutas luego de la datación de las muestras.

De estos análisis se puede concluir que el material fundido de las grandes cuencas se agrupa en dos edades: la región de Imbrium con edades de 3,85Ga, y la región de Nectaris con edades entre 3,9-3,92 Ga. Por otra parte, la corteza de las zonas altas solidificó a ~ 4,45Ga.

La presencia de estos dos tipos de superficies con muy diferentes niveles de craterización ha llevado a plantear la hipótesis de que la región interior del Sistema Solar sufrió un intenso proceso de craterización luego de que los planetas terrestres ya estuvieran formados y que se haya originado la Luna (Figura 8). A este proceso se le conoce cono el Intenso Bombardeo Tardío (Late Heavy Bombardment – LHB). La primer pregunta que surge es si el LHB se trata del final del proceso de acreción de los planetas terrestres o de un evento cataclísmico cientos de millones de años posterior a la finalización de la acreción. La hipótesis del abrupto final del proceso de acreción de los

planetas terrestres (Hartmann 1975) se considera poco plausible; porque la Luna hubiera acretado una mayor masa. Por tanto se favorece la hipótesis de que se produjo un pico en la tasa de impacto a los ~800 Ma (mega-años; 1 Ma = $1x10^6$ años) luego de la formación del sistema Luna-Tierra (Tera et al. 1974). Para tener un pico se requiere que haya habido un aumento repentino en la población de potenciales impactores.

Se han ensayado cuatro escenarios para explicar este evento:

- La fragmentación de un asteroide (Zappala et al 1998). Se ha descartado esta propuesta ya que se hubiera requerido de un asteroide de masa 1000 veces la masa del mayor de los asteroides Ceres.
- La existencia de una población de objetos co-orbitales con la Luna (Cuk y Gladman 2009), que hayan sobrevivido luego de la formación del satélite. Es dinámicamente muy inviable que una población numerosa pueda sobrevivir por escalas de tiempo de cientos de millones de años.
- La existencia de un quinto planeta que alcanzó una inestabilidad dinámica tardía, generando perturbaciones en el cinturón de asteroides (Chambers 2007).
- El aumento del flujo de cometas provenientes del Sistema Solar exterior (Wetherill 1975), ocasionado por la migración de los planetas gigantes (Levison et al. 2001, Gomes et al. 2005). El modelo *Nice* (Gomes et al. 2005) simula el proceso de acreción tardía del Sistema Solar exterior. En algunas simulaciones se observó que la migración de los planetas gigantes condujo a una inestabilidad dinámica que afecto a los 4 planetas gigantes, luego de varios cientos de millones de años posteriores al inicio del proceso. Esa inestabilidad llevó a un rápido desplazamiento de los planetas más exteriores y a una eyección de numerosos planetesimales hacia la región interior del Sistema Solar.

Las causas del bombardeo tardío y la variación de la tasa de impacto en los primeros cientos millones de años luego de la formación del Sistema Solar son temas que todavía no tienen una respuesta definitiva; si bien el modelo *Nice* logra explicar varias de las características del evento.

4. Efectos ambientales de los impactos

Se analizarán diversos momentos en la historia de la Tierra donde los impactos han tenido consecuencias relevantes en varios ecosistemas.

4.1. En el Hadeano

Asumiendo la tasa de impacto en la Luna en el período del LHB, se hubieran generado en la Tierra durante ese período más de 22.000 cráteres de diámetro mayor a 20 km, cerca de 40 cuencas de impacto de más de 1.000km de diámetro y varias cuencas de impacto mayores a 5.000 km. Los daños ambientales serios hubieran ocurrido cada ~100 años. Por tanto las condiciones para el desarrollo de la vida en esas épocas tempranas fueron muy hostiles.

En épocas posteriores al LHB la tasa de impacto tuvo una reducción sustancial, y continúa teniendo un decaimiento lento. La identificación de cráteres en la superficie de la Tierra se ve dificultada por procesos como:

- Cobertura de agua en los Océanos.
- Tectónica de placas que produce la destrucción de corteza y generación de nueva.
- Erosión

Como consecuencia de estos procesos, los cráteres más antiguos identificados en la Tierra no superan los 2,4 Ga, siendo la mayor parte más jóvenes de 1 Ga. Existen del orden de 176 cráteres de impacto confirmados en la Tierra, y más de 800 estructuras de impacto posibles que requieren mayor estudio. En la Figura 9 se presenta un mapa con la ubicación de los cráteres confirmados y más probables de la Tierra. Existe una fuerte asimetría entre cráteres identificados en el Hemisferio Norte y Sur, o más precisamente entre cráteres ubicados en países desarrollados y subdesarrollados.

4.2. Extinciones masivas

Los gigantescos impactos se han considerado como una de las posibles causas de extinción masivas en la Tierra. Pero no son los únicos fenómenos que se han considerado como posibles causas de extinciones. Se presenta un listado no exhaustivo de posibles causas: impactos, erupciones volcánicas masivas, cambios climáticos, cambios en los niveles de los océanos, efecto invernadero pronunciado, actividad del Sol, explosiones de supernova cercanas, explosiones de rayos gamma, pasaje del Sol por los brazos espirales de la Galaxia, etc.

En la Figura 10 se muestra la intensidad de las extinciones, medida como el porcentaje de géneros extintos respecto a un período inmediato anterior, en

función del tiempo (columna de la izquierda). Si bien la extinción más relevante ocurrió en el límite entre el Pérmico y Triásico (P-T) (hace 250 millones de años) cuando más del 90% de las especies desaparecieron; la extinción más conocida y mejor estudiada es la del Cretásico-Terciario (K-T) ocurrida hace 65 millones de años. El límite Cretácico/Terciario divide la "Era de los Dinosaurios" de la "Era de los Mamíferos".

Se han manejado varias alternativas para explicar las causas de esta extinción. Entre ellas destacamos:

- Impacto de un asteroide o cometa
- Impactos múltiples
- Las erupciones volcánicas masivas (*Deccan traps*)

La hipótesis sobre la extinción causada por un gigantesco impacto fue propuesta inicialmente por Álvarez et al (1980). Los autores encontraron en la capa de arcilla que separa K-T una concentración anómala de Iridio. El Iridio es un elemento poco abundante en la corteza terrestre ya que es un elemento siderófilo, y por tanto se fue hacia el núcleo terrestre en el proceso de diferenciación de la Tierra. Mientras que es un elemento abundante en asteroides y cometas no diferenciados. Esa alta concentración de Iridio en la capa límite fue encontrada en diversas partes del planeta, lo que hizo suponer que hubo un depósito global de materiales con altas concentraciones de este elemento en forma simultánea en todo el planeta. La explicación dada por los autores fue que un gigantesco impacto produjo un inmenso cráter y la eyección de grandes cantidades de polvo a la atmósfera, formado por la mezcla de material de la superficie terrestre y del objeto impactor. Este polvo fue arrastrado por los vientos estratosféricos a todo el planeta y fue depositándose en forma global. Las grandes concentraciones de aerosoles llevaron a una fuerte absorción de la luz solar, impidiendo que la radiación llegara a la superficie. Las temperaturas bajaron y se cortó el proceso de fotosíntesis, lo que condujo a la desaparición de gran parte de la flora. Siendo ésta la base de la cadena alimenticia, esto trajo como consecuencia la extinción de gran parte de la fauna, especialmente los grandes animales de la época: los dinosaurios. Solo pudieron sobrevivir algunas especies de animales pequeños que pudieron adaptarse a las condiciones adversas; entre ellos los mamíferos del tamaño de roedores que existían previos al impacto.

Además de las altas concentraciones de Iridio en la capa límite K-T hay otros indicios de una gigantesca colisión ocurrida hace 65 Ma. Como ser: grandes desplazamientos de materiales como producto de un megatsunami

observados en la región del Caribe y el este de los Estados Unidos, cuarzo con metamorfismo de impacto y tectitas halladas en el Caribe.

Finalmente en 1991 se logró ubicar un cráter subterráneo que tendría la edad correspondiente al evento y el tamaño suficiente como para producir una catástrofe a escala global (Hildebrand et al. 1991). El cráter conocido como Chicxulub se ubica bajo la península de Yucatán (México). Tiene un diámetro de 200 km y se pudo detectar gracias a un mapa de anomalías gravimétricas y magnéticas, donde se puede observar la estructura circular del mismo. A nivel de superficie, el único rastro que se puede observar es la distribución circular de cenotes (pozos naturales de aguas), que marcarían el borde del cráter (Pope et al. 1996). Los cenotes han sido utilizados desde la época de los Mayas para la provisión de agua fresca.

Si bien la hipótesis del impacto como causa de la extinción K-T es una de las más aceptadas a nivel de la comunicad académica, hay algunos autores que han cuestionado varios aspectos de la misma. Por ejemplo, Keller et al (2004)

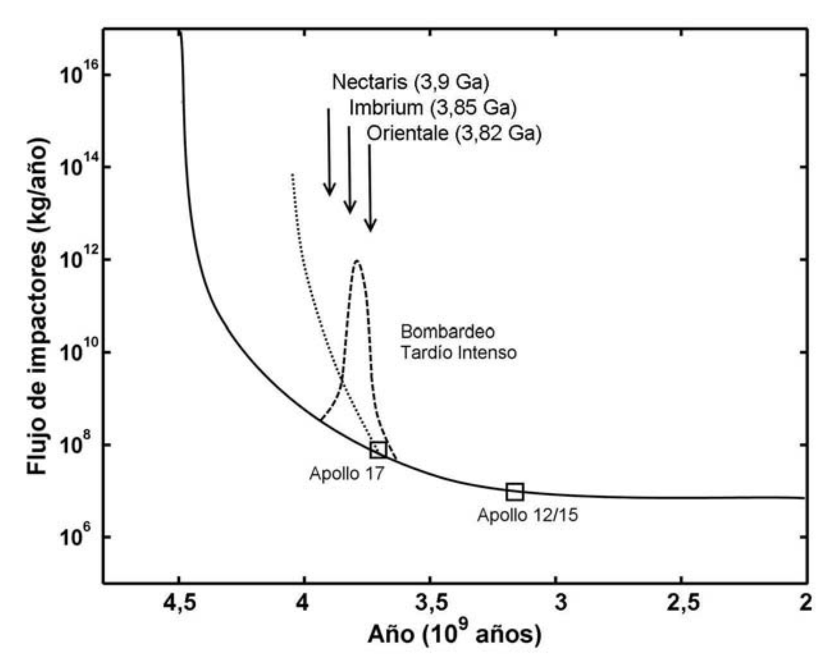


Fig. 8 - Tasa de impacto en la Tierra. La línea llena representa un decaimiento exponencial en el flujo de impactores, y la trayectoria punteada representa el incremento temporal ocurrido durante el LHB. Las edades de las principales cuencas de impacto de la Luna están indicadas (adaptado de Koebert, 2003 y de Tajika, 2008).

han planteado que el cráter de Chixculub antecede al límite KT en algunos cientos de miles de años.

Se ha planteado como alternativa la ocurrencia de múltiples impactos ocurridos en una corta escala de tiempo geológico que hubieran sumado los efectos catastróficos (Mullen 2004). Entre los cráteres que se han identificado con una edad posible en el entorno de los 65 Ma se reconocen: Boltysh en Ucrania, Silverpit en el Mar del Norte y Shiva en el Océano Indico.

Como alternativa a la hipótesis de uno o más impactos, se ha propuesto que erupciones volcánicas persistentes por un prolongado período de tiempo y de grandes proporciones liberaron grandes cantidades de gases tóxicos y cenizas a la atmósfera, lo que ocasionó las extinciones masivas (Duncan y Pyle, 1988). En la ubicación de la actual India, se encuentran los denominados *Deccan traps* (*trappa* – escalera en sueco), que corresponden a una gigantesca provincia ígnea con una edad consistente con los 65 Ma del límite K-T. Las *Deccan Traps* consisten de varias capas de inundaciones de lava volcánica, de más de 2000m de espesor y que se extiende por más de 500.000 km^2. Llama la atención que si uno toma en cuenta la deriva de las placas tectónicas y ubica al cráter de Chixulub y a los *Deccan traps* en la posición que hubieran estado hace 65 M años, los puntos se encuentran casi diametralmente opuestos (Figura 11). Esto ha llevado a manejar la propuesta de que las gigantescas erupciones volcánicas que generaron los *Deccan traps* sean el producto del enfocamiento en las antípodas de la onda de choque generada a partir del impacto que produjo el cráter de Chicxulub. Este efecto hubiera producido desplazamientos magmáticos que hubieran subido a la superficie generando las gigantescas provincias volcánicas.

El caso de la extinción K-T no está cerrado, y menos aún el de las otras extinciones masivas. En varias de ellas existen cráteres candidatos a ser asociados como causa de la extinción así como otras provincias volcánicas correspondientes a similares edades.

También se da la situación inversa, la existencia de gigantescos cráteres o erupciones volcánicas masivas sin una aparente extinción masiva asociada, lo que ha llevado a considerar que la vinculación entre eventos catastróficos extremos y extinciones no es lineal y pueda ser un fenómeno multi-casual.

4.3. Impactos recientes

Existen varios ejemplos de eventos colisionales recientes en la Tierra y otros planetas del Sistema Solar.

El evento Tunguska

El evento Tunguska fue la explosión de un meteoro ocurrida en las riveras del río Podkamennaya Tunguska localizado en 61ºN,102ºE, pasadas las 7 am del 30 de junio de 1908, en la estepa siberiana (ver por ej. Sánchez Bettucci et al. 2009). El evento fue registrado por varios sismógrafos y barómetros en Asia y Europa. Los testigos afirmaron ver columnas de fuego surcando el cielo. Subieron las aguas de ríos, arroyos y lagos (Merril, 1928). 2000 km² de taiga de Tunguska quedaron devastados, ocho millones de árboles fueron aplastados (Longo et al. 2005, Figura 12a). En los días posteriores al evento, las noches en toda Europa tuvieron un brillo inusual, producto de la dispersión de la luz por el polvo depositado en la atmósfera.

Kulik (1927), quién tomara las primeras un fotografías de la devastación (Figura 12b), sugirió que se trataba del impacto de un agregado de meteoros

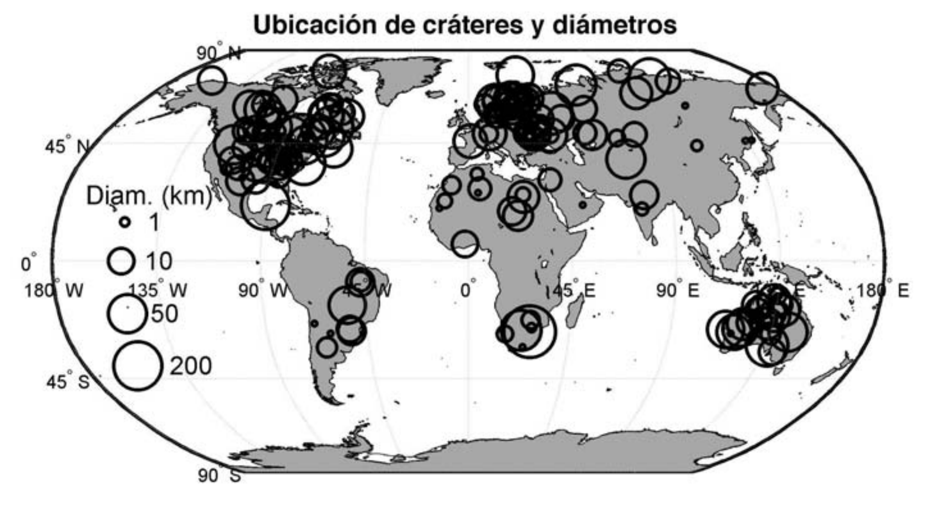


Fig. 9 - Mapa de la ubicación de cráteres confirmados y más probables de la Tierra. Ubicación y tamaños de los cráteres tomados de *The Earth Impact Database* (http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/)

de hierro y roca. Sin embargo, no se han encontrado fragmentos mayores ni evidencias de cráteres. Este hecho ha llevado a una discusión en la comunidad académica en cuanto a que el objeto impactor fuera un asteroide o un cometa, ya que se ha supuesto que este último se podría haber desintegrado más fácilmente en la atmósfera. En la última década se han hecho varias expediciones para estudiar la zona. Se ubicó una depresión conocida como Lago Cheko, la cual algunos autores consideran pueda asociarse a un cráter de impacto producido en el momento de la colisión (Gasperini et al. 2007, ver discusión en Sánchez Bettucci et al. 2009).

Recientes simulaciones numéricas del ingreso del bólido en la atmósfera y su destrucción usando supercomputadoras en Sandia Lab han permitido reducir los valores de energías necesarias para causar los fenómenos registrados (Boslough y Crawford 2008). Según estos resultados la energía cinética del impactor estuvo entre 3 y 5 M TNT, correspondiente a un asteroide de 40 m de diámetro.

El cráter de Carancas

El 15/9/2007 a las 11:45 hora local del Perú (16:45 TU) en la Comunidad de Carancas, Distrito de Desaguadero, Provincia de Puno, Perú se observa a pleno día un bólido cruzando el cielo de E a W, que deja atrás una estela de humo (Tancredi et al. 2009). Se oyen además explosiones de larga duración que rompen los vidrios de varias fincas. Se observa a distancia una explosión y la formación de una columna de humo. En el lugar de donde provenía la columna de humo se observó la formación de un cráter.

Al llegar hasta el lugar, los pobladores observan que el cráter contiene agua en su interior y despide olores molestos (Figura 13). Se recogen varias piezas de material no típico de la zona del cráter. Las piezas recogidas fueron analizadas en varios laboratorios, concluyendo que se trata de un meteorito condrítico tipo H4/5. El cráter formado tiene un diámetro de 13,5m, y una profundidad de por lo menos 2,4m. Su estructura corresponde a un cráter de explosión por impacto y no a un hoyo de penetración. El material eyectado del cráter alcanza distancias de más de 300m. Se desconoce si puede haber una masa grande al interior del cráter. Hay registros desde estaciones de infrasonido en La Paz (70 km del lugar) y Asunción (1600 km) de la onda de choque producida por el bólido en la atmósfera, así como registros sísmicos desde varias estaciones sismográficas en Perú y Bolivia de la onda sísmica producto del impacto y de la onda de presión atmosférica.

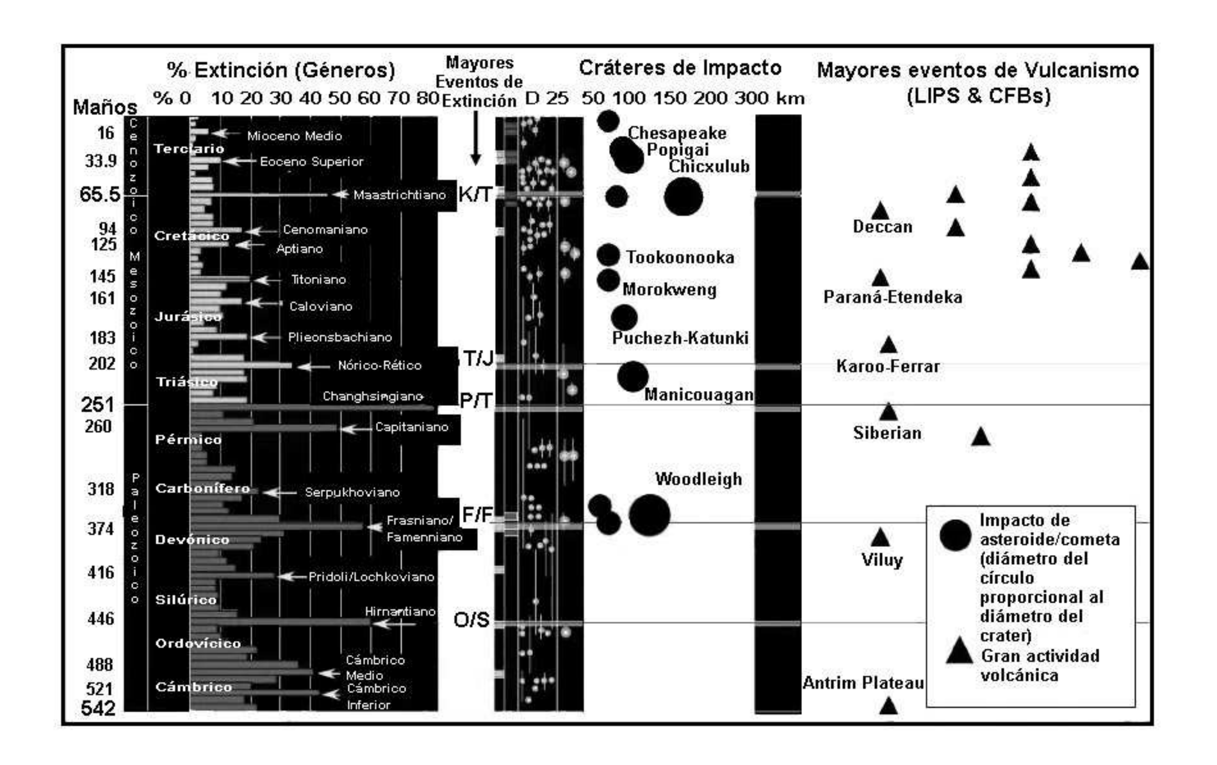


Fig. 10 - Tasas de extinción de géneros durante el Fanerozoico. Se compara con cráteres de impacto (el tamaño de los círculos es proporcional al diámetro del cráter) y los principales eventos volcánicos: grandes provincias ígneas (Large Igneous Province – LIPs) e inundaciones de basalto continentales (Continental Food Basalts – CFBs) (adaptado de Keller, 2005 y de Glikson, 2009)

Resumimos algunas de las características más notables de este evento (Tancredi et al. 2009):

- La masa inicial del meteoroide antes de ingresar a la atmósfera era entre 7 y 12 toneladas métricas, lo que corresponde a un diámetro entre 1,6 y 2 m. La velocidad inicial fue en el rango de 12 a 17 km/s, y la energía cinética entre 0,1 y 0,4 kT TNT. La órbita heliocéntrica es compatible con las órbitas conocidas de Near-Earth Asteroids.
- Se registró por primera vez en la Tierra la señal sísmica producto de una colisión en la superficie de nuestro planeta.
- El análisis petrológico de minerales presentes en el material eyectado indican niveles de metamorfismo de impacto compatibles con presiones pico en el punto de impacto de por lo menos algunos GPa.
- La energía del impacto fue estimada por varios métodos independientes usando diferentes conjuntos de datos, incluyendo: la explosión registrada por las estaciones infrasónicas y sísmicas, los efectos de la onda de sobrepresión atmosférica sobre testigos y la distribución del material eyectado. Todas las estimaciones son coincidentes con una energía de impacto en el rango de ~1– 3 tons TNT.
- La velocidad de impacto en la superficie fue superior a ~3 km/s, e inferior a 6 km/s. El cráter se formó como consecuencia de un evento de impacto de hiper velocidad (velocidades de impacto superiores a la velocidad del sonido en el material del blanco). La masa del impactor estuvo en el rango 0,3 de 3 ton, con un diámetro entre 0,6 y 1,1m.
- A pesar de la significativa ablación sufrida por el meteoroide en su paso por la atmósfera, éste no se destruyó catastróficamente ni se dispersó, impactando en superficie como un objeto monolítico.
- No hay indicaciones de que hubiera fragmentos de gran tamaño dentro del cráter.
- Los problemas de salud reportados por los pobladores y los medios de prensa fueron tremendamente exagerados.

Un evento como el ocurrido en Carancas está en contradicción con la idea muy difundida de que un meteoroide de unos pocos metros de diámetro no sobrevive al pasaje por la atmósfera, sin llegar a impactar en la superficie y producir un cráter. Tampoco esta en acuerdo con los modelos de entrada de meteoroides rocosos. Por tanto, ha sido necesario ensayar ideas alternativas o considerar que el uso de parámetros promedios en los modelos puede no lograr representar la variedad de situaciones que se pueden plantear.

Colisiones contra Júpiter

La densidad espacial de cometas, en cualquier instante, tiene su máximo en las inmediaciones donde se ubique el planeta Júpiter (Tancredi y Lindaren, 1992). Esto se debe a que los cometas de corto período tienden a concentrar sus afelios a la distancia de este planeta y éste controla el movimiento de los cometas a través de frecuentes encuentros. Este hallazgo motivó búsquedas de cometas en la vecindad de Júpiter (Tancredi y Lindgren, 1994). En 1993, en conocimiento de estos resultados, G. y C. Shoemaker junto a D. Levy apuntaron por primera vez su telescopio de búsquedas de NEAs a las inmediaciones de Júpiter. Allí descubrieron un objeto inusual, no era una traza dejada por un objeto puntual ni un cometa con su característica coma (IAUC 5725). Se trataba de un tren de más de una decena de núcleos cometarios. Un cometa había sido capturado temporariamente en una órbita tipo satélite entorno a Júpiter. Durante un pasaje a una distancia inferior al límite de Roche en el año 1992, el cometa fue fracturado y sus fragmentos se fueron separando, formando el tren de núcleos observados. Entre los días 16 y 22 de julio de 1994, 21 impactos de núcleos cometarios fueron registrados contra Júpiter, dejando marcas en la atmósfera del planeta que, en algunos casos, superaron en diámetro a nuestra Tierra y perduraron por semanas.

La tasa de impacto de objetos entre 0,5 y 1 km de diámetro contra Júpiter ha sido estimada en el orden de un evento cada 50–350 años (Zahnle et al. 2003)

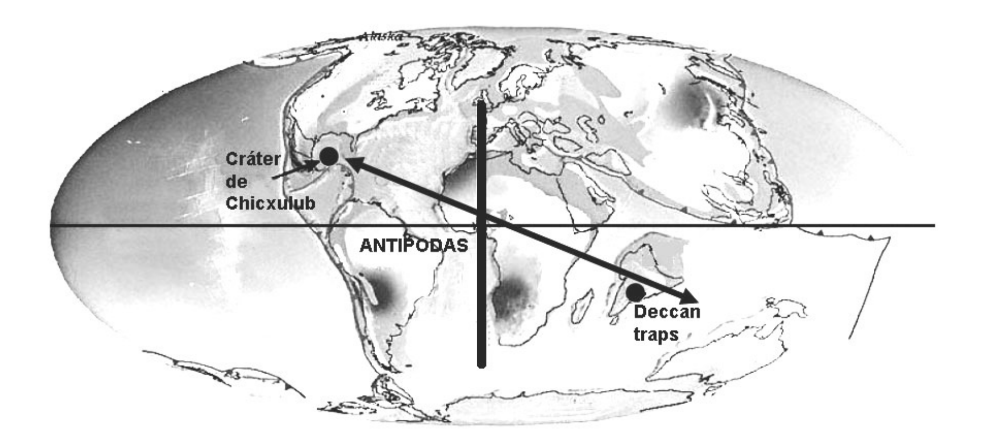


Fig. 11 - Paleomapa de la Tierra para el momento del evento K-T (66 Ma). Mapa proporcionado por el PaleoMap Project (Scotese 2003) y adaptado para mostrar la ubicación del cráter de Chicxulub y los Deccan Traps.

No obstante, el descubrimiento de recientes colisiones de nuevos objetos contra Júpiter ha hecho rever esta estimación, considerándose que la tasa de impactos pueda ser entre 5 y 10 veces más frecuentes (Sánchez-Lavega et al. 2010).

5. La frecuencia de impactos en el presente y su prevención

El reconocimiento de que la extinción de los dinosaurios pudo tener como causa más probable la colisión de un asteroide o un cometa despertó, a partir de la década de los ’90, un interés por el descubrimiento de los objetos cercanos a la Tierra: Near Earth Objects (NEOs). Dentro de éstos, la población mayoritaria es de NEAs, los que se definen como objetos con distancia perihélica inferior a 1,3 Unidades Astronómicas. Este aumento de interés en la clasificación y caracterización de NEAs queda evidenciado en el dramático incremento que ha tenido la tasa de descubrimiento (Figura 14). Actualmente la población de NEAs descubiertos asciende a más de 7000 objetos, pero de ellos poco más de 800 son mayores a 1 km de diámetro. Gracias a los esfuerzos de programas

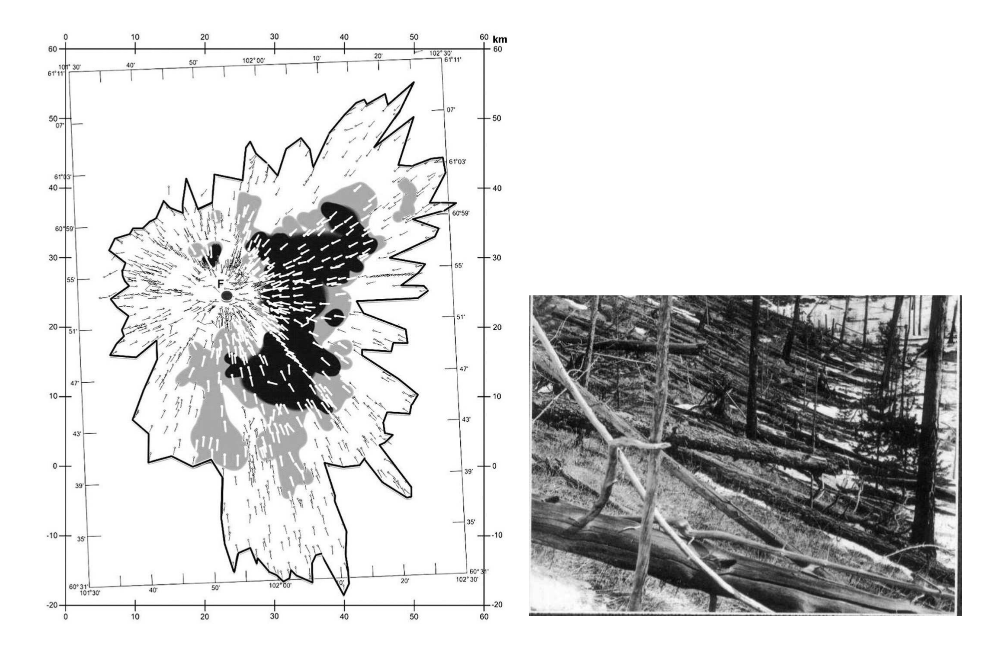


Fig. 12 - a) Mapa de la dirección y extensión de los árboles caídos. En los ejes inclinados se muestra la latitud y longitud correspondiente. b) Foto tomada por L. Kulik en 1929. (Imágenes cedidas por *Tunguska Page of Bologna University*: http://www.th.bo.infn.it/tunguska/)

de búsqueda que se fijaron el objetivo de descubrir el 90% de los asteroides potencialmente peligrosos antes del año 2013, en el presente (2010) se estima que solamente resta por descubrir menos del 20% de los asteroides mayores de 1km que pueden impactar la Tierra. Ninguno de los asteroides descubiertos en ese rango de tamaños tiene posibilidades de impactar nuestro planeta en los próximos 100 años. La evolución dinámica futura es imposible de predecir con la exactitud necesaria para determinar las probabilidad de colisión dado el carácter caótico del movimiento de estos objetos; ya que se encuentran sometidos a frecuentes encuentros cercanos con los planetas, especialmente la Tierra y en algunos casos Júpiter, que generan inestabilidades en sus órbitas (Tancredi, 1999).

A partir de la combinación de diversas fuentes de datos, se ha podido estimar la distribución cumulativa de NEAs en función de diversos parámetros como: magnitud absoluta, tamaño o energía de impacto (Figura 15). Lo que se puede traducir en una frecuencia de impacto y compararlo con alguno de los eventos conocidos antes descriptos.

Para el riesgo que significa la llegada de asteroides a la Tierra se puede hacer el siguiente ordenamiento (para el cálculo del tamaño del impactor se asume un asteroide con velocidad de impacto de 17 km/s y densidad 3 gr/cm^3, un cometa generalmente impactará a velocidades mayores, lo que implica un tamaño menor del impactor para una energía dada):

- Bólidos con energías menores a 1 MT, con un diámetro del impactor <25m. No producen generalmente cráteres en la superficie, solamente un gran despliegue luminoso en el cielo, sin daños a nivel superficial.
- Pequeños impactos con energías < 15 MT (evento clase *Tunguska*), con un diámetro del impactor <65m. Pueden producir cráteres de hasta ~1 km. Los daños son similares a una gran bomba nuclear, pudiendo

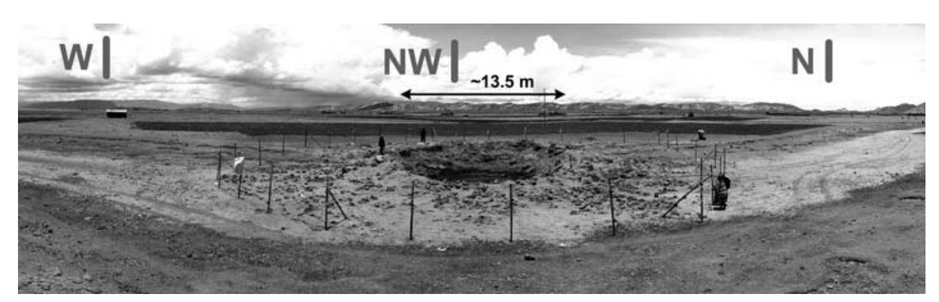


Fig. 13 - Foto del cráter de Carancas (Trancredi et al., 2009)

destruir un área equivalente a una ciudad de tamaño mediano. Este tipo de eventos se producirían con una frecuencia de pocos cientos de años. El riesgo es menor que el debido a otros desastres naturales como terremotos, huracanes, erupciones, etc..

- Catástrofes locales (~10,000 MT), con un diámetro del impactor <500m. Pueden producir cráteres de ~10 km. Un impacto de este orden podría destruir un área equivalente a un pequeño país. El intervalo de tiempo promedio entre este tipo de impactos en la Tierra es de ~100,000 años. El riesgo es moderado respecto a otros desastres naturales.
- Grandes catástrofes regionales (< 1 millón MT), con un diámetro del impactor <2,5km. Pueden producir cráteres de unas pocas decenas de km. Un impacto de este orden destruiría un continente, pero sus consecuencias se verían a escala global. El intervalo de tiempo promedio entre este tipo de impactos es de unos pocos millones de años. El riesgo es comparable al de otros desastres naturales.
- Catástrofe global (> 1 millón MT), con un diámetro del impactor >2,5km. Pueden producir cráteres de >50 km. Los daños ambientales producidos por un impacto de este orden son de escala global, peligrando el desarrollo de la civilización. El intervalo de tiempo promedio entre este tipo de impactos es de 10 millones de años. El riesgo que implica este tipo de eventos, promediado en largos períodos de tiempo y a escala global, es mayor que cualquier otro desastre natural.

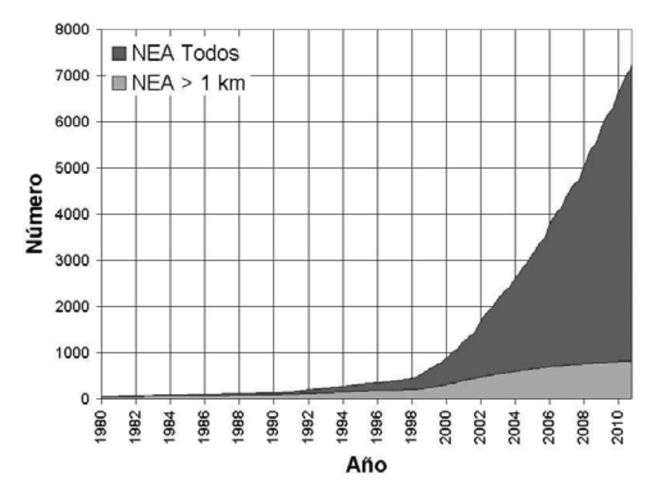


Fig. 14 - Evolución del número de descubrimiento de Near-Earth Asteroids desde 1980 al presente. Datos tomados de *NEAs Discovery Statistics* (http://neo.jpl.nasa.gov/stats/)

Por tanto, las acciones de mitigación y prevención frente a un posible desastre ocasionado por el impacto de un asteroide, se justifican únicamente en los tres últimos casos. La destrucción total del impactor es una opción inviable por las enormes energías necesarias para una destrucción catastrófica y los riesgos que implicaría la generación de una población de nuevos pequeños impactores en órbitas similares al original. Se favorecen las opciones de deflexión del asteroide en una órbita no colisionante. Las acciones a tomar dependerán fuertemente del intervalo de tiempo que habría entre la caracterización de asteroide potencialmente impactor y el momento del impacto. Cuanto más grande sea este intervalo es menor la energía necesaria para la deflexión. Las opciones que involucran el uso de tecnología nuclear presentan riesgos que podrían ser comparables al propio impacto del asteroide. Recientemente se han ideado algunas alternativas no-nucleares que pueden ser potencialmente

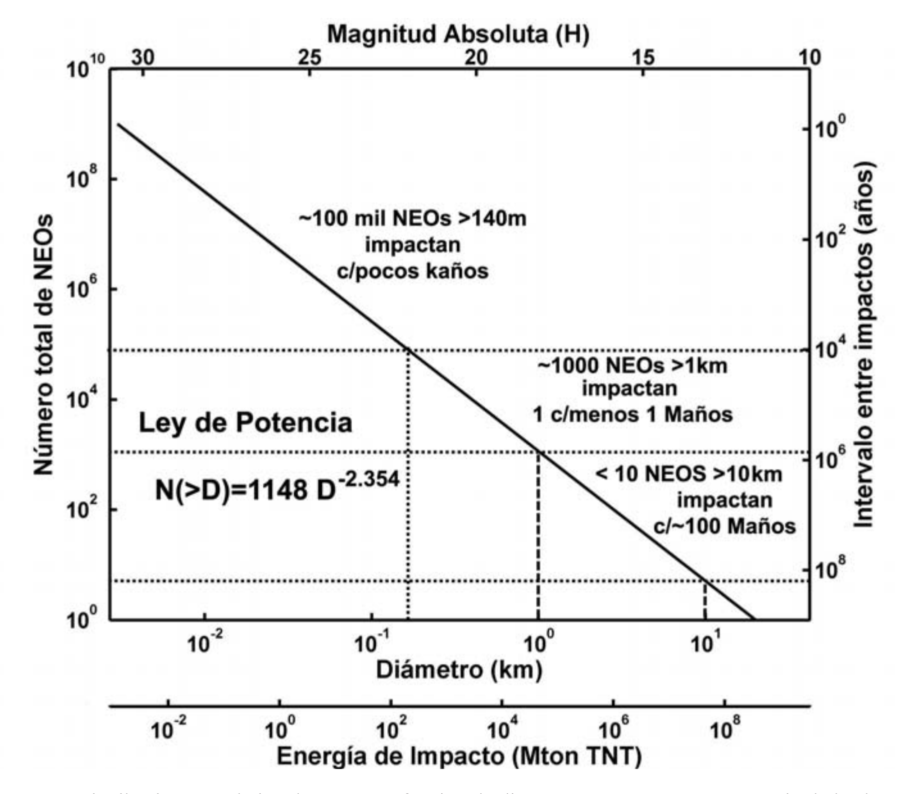


Fig. 15 - Distribución cumulativa de NEAs en función de diversos parámetros como: magnitud absoluta, tamaño o energía de impacto. Se considera una ley potencial como buen ajuste a los datos observados (NASA's NEO Report, 2007). También se muestra la frecuencia de impacto y la comparación con alguno de los eventos de impacto.

muy favorables para lograr una deflexión en intervalos de tiempo de previsión de meses a años (ver por ej. NASA's NEO Report, 2006, 2007) como ser:

- Remolcador asteroidal (*Asteroid Tugboat*): se colocaría una sonda espacial amarrada al asteroide y lo empujaría en una nueva órbita
- Ablación solar: se colocaría una pantalla gigante cercana al asteroide que reflejaría la luz solar, concentrándola en un punto de la superficie, alcanzando grandes temperaturas que ocasionarían la ablación del material superficial.
- Tractor gravitacional: la atracción gravitatoria mutua entre el asteroide y una sonda espacial cercana que esté intentando continuamente alejarse del asteroide, produciría un desplazamiento del asteroide hacia una nueva órbita.

6. Conclusiones

Los impactos han jugado un rol fundamental tanto en el proceso de formación de nuestro planeta como en afectar el desarrollo de la vida en su superficie. Si bien la tasa de colisiones entre pequeños cuerpos del Sistema Solar y los planetas ha disminuido drásticamente en los últimos 4 mil millones de años, todavía existe una población de objetos que pueden llegar a impactarlos. Ha habido ejemplos recientes de impactos tanto contra nuestro planeta como en forma más dramática contra Júpiter. La población de asteroides cercanos a la Tierra (NEAs) que puede significar un potencial riesgo para la vida en nuestro planeta se estima en 1000 objetos, de los cuales cerca del 80% se han descubierto en los últimos años. Si bien ninguno de los objetos conocidos representa un riesgo de impacto en el próximo siglo, se deben continuar los esfuerzos para desarrollar acciones de mitigación y prevención segura ante un evento que tarde o temprano va a ocurrir.

Referencias

Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F., y Michel, H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction, *Science*, vol. 208: 1095–1108, 1980.

Boslough, M., Crawford, D. Low-altitude airbursts and the impact threat, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35: 1441-1448, 2008.

Canup, R. M. Simulations of a late lunar-forming impact, *Icarus*, vol. 168 : 433-456, 2004.

Chamberlin, A. http://neo.jpl.nasa.gov/stats/, 2010.

Chambers, J. E. On the stability of a planet between Mars and the asteroid belt: Implications for the Planet V hypothesis, *Icarus*, vol. 189: 386-400, 2007.

Cuk, Matija y Gladman Brett, J. The fate of primordial lunar Trojans, *Icarus*, vol. 199: 237-244, 2009.

Duncan, R. y Pyle, D. Rapid eruption of the Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary, *Nature*, vol. 333: 841–843, 1988.

French, B. M. *Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structure,* Houston, LPI Contribution No. 954, Lunar and Planetary Institute, 1998.

Gasperini, L., Alvisi, F., Biasini, G., Bonatti, E., Longo, G., Pipan, M., Ravaioli, M. y Serra, R. A possible impact crater for the 1908 Tunguska Event, *Terra Nova*, vol. 19 (4): 245–251, 2007.

Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K. y Morbidelli, A. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets, *Nature*, vol. 435: 466-469, 2005.

Harris, A. What Spaceguard did, *Nature*, vol. 453: 1178-1179, 2008.

Hartmann, W. K. Lunar 'cataclysm' - A misconception, *Icarus*, vol. 24: 181-187, 1975.

Hartmann, W. K. y Davis, D. R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin, *Icarus*, vol. 24: 504-514, 1975.

Hildebrand, A., Penfield, G., Kring, D., Pilkington, M., Zanoguera, A., Jacobsen, S. y Boynton, W. Chicxulub Crater, a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico, *Geology*, vol. 19: 867–871, 1991.

Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Rebolledo-Vieyra, M., Urrutia Fuccugauchi, J., Kramar, G., y Stueben, D. (2004) Chicxulub predates the K/T boundary Mass Extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101, 3753-3758.

Koeberl, C. The Late Heavy Bombardment in the Inner Solar System: Is there any Connection to Kuiper Belt Objects?, *Earth, Moon and Planets*, vol. 92: 79–87, 2003.

Kulik, L. K istorii bolida 30/VI 1908 g., Doklady AN SSSR, seria A, 23, 393–398 (1927).

Levison, H., Dones, L., Chapman, C., Stern, A., Duncan, M., y Zahnle, K. Could the Lunar "Late Heavy Bombardment" Have Been Triggered by the Formation of Uranus and Neptune?, *Icarus*, vol. 151: 286-306, 2001.

Longo, G., Di Martino, M., Andreev, G., Anfinogenov, J., Budaeva, L., y Kovrigin, E. A new unified catalogue and a new map of the 1908 tree fall in the site of the Tunguska Cosmic Body explosion en *Asteroid-comet Hazard-2005*, St. Petersburg, Russia, Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences pp. 222-225, 2005.

Melosh, H. *Impact Cratering: A Geologic Process*. New York: Oxford Univ. Press, 1989.

Merril, G. The Sieberian Meteorite, *Science*, vol. 1741: 489-490, 1928.

Mullen, L. Multiple impacts, *Astrobiology Magazine,* http://www.astrobio.net/exclusive/1253/multiple-impacts, 2004.

NASA's NEO Report Near-Earth Object Survey and Deflection Study http://www.hq.nasa.gov/office/pao/FOIA/NEO_Analysis_Doc.pdf, 2006.

NASA's NEO Report Near-Earth Object Survey and Deflection Analysis of Alternatives. http://www.nasa.gov/pdf/171331main_NEO_report_march07.pdf, 2007.

Pope, K., Ocampo, A., Kinsland, G. y Smith, R. Surface expression of the Chicxulub crater, *Geology*, vol. 24: 527–30, 1996.

Rajmon, D. Impact database 2010.1. http://impacts.rajmon.cz, 2009.

Sánchez Bettucci, L., Núñez, P., Martínez Blanco, X., Tancredi, G. Consideraciones sobre el Evento Tunguska y la Génesis del Lago Cheko, al cumplirse los 100 años, *Revista Sociedad Uruguaya de Geología*, vol. 15: 63-67, 2009.

Sánchez-Lavega, A. et al. The impact of a large object on Jupiter in 2009 July, Astrophysical Journal Letters, vol. 715: L155–L159, 2010.

Scotese, C. PaleoMap Project, http://www.scotese.com/, 2003.

Tajika, E. Theoretical constraints on early earths environment, *Viva Origino*, vol. 36: 55 – 60, 2008.

Tancredi, G. Chaotic dynamics of planet-encountering bodies, *Celestial Mechanics*, vol. 70: 181-200, 1998.

Tancredi, G. y Lindgren, M. The vicinity of Jupiter: a region to look for comets en A. Harris y E. Bowell (eds.) Proc. of *Asteroids, Comets and Meteors 91*, Houston, Texas, pp. 601-604, 1992.

Tancredi, G. y Lindgren, M. Searching for comets encountering Jupiter: First campaign, *Icarus*, vol. 107: 311-321, 1994.

Tancredi, G., Ishitsuka, J., Schultz, P., Harris, R., Brown, P., ReVelle, D., Antier, K., Le Pichon, A., Rosales, D., Vidal, E., Varela, M. E., Sánchez, L, Benavente, S., Bojorquez, J., Cabezas, D. y Dalmau, A. A Meteorite Crater on Earth formed in September, 15 2007: the Carancas Hypervelocity Impact, *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 44: 1967-1984, 2009.

Tera, F., Papanastassiou, D. A. y Wasserburg, G. J. Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 22: 1-21, 1974.

Wetherill, G. W. Late heavy bombardment of the moon and terrestrial planets en *Proceedings of the Lunar Science Conference, 6th*, vol. 2, New York, Pergamon Press, Inc., pp. 1539-1561, 1975.

Zahnle, K., Schenk, P., Levison, H. y Dones, L. Cratering rates in the outer Solar System, *Icarus*, vol. 163: 263–289, 2003.

Zappala, V., Cellino, A., Gladman, B. J., Manley, S. y Migliorini, F. Asteroid Showers on Earth after Family Breakup Events, *Icarus*, vol. 134: 176-179, 1998.

Capítulo 8

La búsqueda de vida en Titán

César Bertucci

Resumen Con una atmósfera densa, rica en nitrógeno, y una superficie helada modificada por cursos de compuestos orgánicos líquidos, Titán es uno de los cuerpos del Sistema Solar más atractivos desde el punto de vista astrobiológico. Desde 2004, la nave espacial Cassini realiza un relevamiento remoto e 'in situ' (gracias a la sonda Huygens) de las propiedades químicas y físicas de la atmósfera y la superficie de Titán. En este capítulo pasaremos revista a las observaciones más relevantes y sus implicancias exobiológicas. En particular, estudiaremos la manera en la que el metano y el etano siguen una especie de ciclo similar al del agua en la Tierra, con sus fuentes y sumideros: ¿puede este ambiente sin embargo ser propicio para el surgimiento de formas de vida de tipo terrestre? Ante el hecho de que la presencia de agua líquida pueda ser una restricción importante para la vida, discutiremos la posibilidad de que existan reservorios de agua líquida por debajo del hielo superficial.

Abstract With a dense, nitrogen-rich atmosphere and an icy crust carved by organic liquid flows, Titan is one of the most astrobiologically interesting places in the solar system. Since 2004, the Cassini spacecraft has carried out remote and 'in situ' (through the Huygens probe) observations of the chemical and physical properties of the atmosphere and surface of Titan. In this chapter, the most relevant observations and their exobiological implications will be reviewed. In particular, we will study the way in which methane and ethane are involved in a cycle similar to the water cycle on Earth: could this environment be suitable for terrestrial-like life forms? Since the presence of liquid water could be a strong constraint for life, the possibility of the existence of liquid water reservoirs below the icy crust will be discussed.

César Bertucci (✉)

Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET/Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria, Buenos Aires, Argentina - Casilla de Correo 67 - Suc. 28 (C1428ZAA)

Space & Atmospheric Physics Group, The Blackett Laboratory, Imperial College London

Prince Consort Road, London SW7 2BW, UK
cbertucci@iafe.uba.ar

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 177 - 194, © 2010 UNESCO-Montevideo.

1. Introducción: Titán antes de Cassini

Descubierta en 1655 por el astrónomo Christiaan Huygens, Titán es el segundo satélite más grande del sistema solar y el único dotado de una atmósfera ópticamente densa.

La primera evidencia sobre la presencia de una atmósfera en torno a Titán fue obtenida por Kuiper (1944) quien detectó metano (CH_4) espectroscópicamente a partir de observaciones desde la Tierra. Observaciones posteriores revelaron la presencia de otros hidrocarburos como el etano (C_2H_6) y el acetileno (NH_3) (Danielson et al., 1973). En particular, la presencia de C_2H_6 fue interpretada como producto de la fotoquímica del CH_4 (Strobel et al. 1974).

Sin embargo, todavía no se sabía si Titán poseía una atmósfera tenue compuesta en su mayoría por CH_4 o una mucho más densa, compuesta principalmente por un elemento espectroscópicamente inerte como el nitrógeno (N_2) (Hunten, 1973). Esta incógnita recién se develó cuando en noviembre de 1980, la nave Voyager 1 sobrevoló Titán y sus instrumentos remotos detectaron una atmósfera compuesta en su mayoría por N_2, seguido de CH_4 (Lindal et al. 1983).

Tabla 1 - Principales características de Titán.

Radio	2575 km
Gravedad en la superficie	1,35 m s^{-2} (0,14 veces el valor en la Tierra)
Densidad	1,88 kg dm^{-3} (0,34 veces el valor en la Tierra)
Distancia media a Saturno	20,2 Radios de Saturno (~ 1,2 x 10^6 km)
Período orbital	~16 días

La presencia de hidrocarburos y nitrilos en la estratósfera confirmaron la idea que el CH_4 con el N_2, estaban siendo convertidos en hidrocarburos y nitrilos más complejos por acción de la fotólisis, con el consiguiente escape de hidrógeno.

La corta vida del CH_4 atmosférico de acuerdo a modelos fotoquímicos (Yung et al. 1984) llevó a postular la presencia de fuentes, especialmente subsuperficiales. Un reservorio subsuperficial de CH_4 líquido dos órdenes de magnitud más abundante que el atmosférico y conteniendo etano (C_2H_6), producto más inmediato de la fotólisis del CH_4, fue postulado por Flasar et al. (1983):

$$2CH_4 + h\nu \rightarrow C_2H_6 + 2H^*$$

Por otro lado, observaciones milimétricas iban en contra de la idea de océanos superficiales pero revelaban la presencia de una superficie cubierta de hielo de agua (Lellouch et al. 2004). Pasarían alrededor de 25 años antes de que otra sonda, Cassini, pudiera realizar mediciones en cercanías de Titán.

2. La misión Cassini/Huygens

Lanzada desde Cabo Cañaveral en octubre de 1997, la nave espacial Cassini se insertó en órbita alrededor de Saturno a fines de junio de 2004. Desde ese entonces, Cassini ha realizado más de 110 órbitas alrededor del planeta. Recientemente, NASA aprobó la extensión de la misión hasta el 2017, con lo cual hasta ese entonces se habrá estudiado al planeta durante casi medio período orbital (dos períodos estacionales).

La misión Cassini tiene como principal objetivo el estudio de Saturno y su sistema de anillos y lunas. Asimismo, el estudio de la atmósfera, la superficie y el interior de Titán es un objetivo central de la misión. A este fin se previó la exploración in situ llevada a cabo por la sonda Huygens así como también una centena de pasajes orbitales (o ‘flybys’) por parte del orbitador a través de la alta atmósfera y su entorno de plasma, a altitudes tan bajas como 880 km.

El orbitador Cassini

Con un peso de casi 6 toneladas y un largo de casi 7 metros, la nave espacial Cassini consta de 6 instrumentos para la observación remota en distintos rangos del espectro electromagnético:

- Subsistema de radio - RSS.
- Radar.
- Espectrómetro infrarrojo - CIRS.
- Espectrómetro de mapeo visible e infrarrojo - VIMS.
- Subsistema de imagen - ISS.
- Espectrógrafo de imagen ultravioleta - UVIS.

A éstos se le suman instrumentos que caracterizan los campos electromagnéticos y las partículas:

- Magnetómetro - MAG.
- Instrumento de ondas de plasma y radio - RPWS.
- Espectrómetro de Plasma - CAPS.
- Analizador de polvo cósmico - CDA.
- Espectrómetro de masa de iones y neutros - INMS.
- Instrumento de imágenes magnetosféricas - MIMI.

Huygens

Por otro lado, la sonda Huygens, de 300 kg de peso y protegida por un escudo térmico durante su entrada en Titán, llevaba a bordo 6 instrumentos destinados a caracterizar las propiedades físicas, químicas de la atmósfera y la superficie de Titán durante y después de su descenso.

- Instrumento de estructura atmosférica - HASI: paquete que incluye un acelerómetro para conocer la densidad atmosférica, medir vientos, y eventualmente el vaivén al flotar sobre una hipotética superficie líquida, un sensor de presión y temperatura y un analizador de las propiedades eléctricas de la superficie.
- Experimento de viento Doppler - DWE: Instrumento que permitió medir la intensidad de los vientos a partir del corrimiento Doppler de la frecuencia de la onda de radio enviada desde Huygens a Cassini.
- Radiómetro espectral y de imagen - DISR: Instrumento destinado a medir la intensidad de la radiación solar y a tomar imágenes de la superficie de Titán durante el descenso y una vez en la superficie.
- Colector de aerosoles y pirolisador - ACP: Los aerosoles recolectados a través de filtros a distintas alturas son calentados en hornos que vaporizan los volátiles y descomponen los materiales orgánicos complejos.
- Cromatógrafo de gas y espectrómetro de masa - GCMS: Un analizador químico de gas que identifica y mide concentraciones químicas en la atmósfera de Titán a partir de muestras tomadas durante el descenso. El espectrómetro de masa provee las masas moleculares de los diferentes gases. El Cromatógrafo de gases permite la separación de las especies moleculares e isotópicas. Durante el descenso, GCMS analiza productos de pirólisis provenientes del ACP. Finalmente GCMS mide la composición química de la superficie de Titán al calentar el material en contacto con la sonda.
- Paquete de ciencia de superficie - SSP: conformado por una sonda acústica un acelerómetro y un sensor de inclinación.

El descenso de Huygens sobre la superficie de Titán tuvo lugar el 15 de enero de 2005. Durante la primera etapa del descenso, Huygens atravesó la alta atmósfera a velocidades inicialmente hipersónicas (*Mach ~ 25*) que fueron disminuyendo producto del rozamiento atmosférico con su escudo térmico hasta menos de 1400 km/h a 180km de altitud, experimentando fuerzas de hasta 12 g [2]. Una vez que la velocidad había decrecido a *Mach = 1,4* (290 km/h a 160 km de altitud) la parte posterior del escudo térmico fue removido y el paracaídas principal de más de 8 metros de diámetro fue desplegado. El escudo térmico fue removido 30 segundos más tarde y 15 minutos más tarde de su despliegue, el paracaídas principal fue soltado, dejando su función a un paracaídas más pequeño de 3 m de diámetro a fin de asegurarse que la sonda llegara a la superficie 30 minutos antes de que Cassini pasara por debajo del horizonte. El lapso de tiempo transcurrido desde la entrada en la atmósfera hasta el aterrizaje fue de 2 horas, 27 minutos y 50 segundos.

Huygens impactó con la superficie de Titán a una velocidad de aproximadamente 18 km/h. Una vez sobre la superficie, las 5 baterías a bordo duraron mucho más tiempo que el esperado, lo cual permitió a Huygens continuar funcionando durante varias horas después del aterrizaje (Lebreton, et al., 2009).

3. Titán vista por Cassini/Huygens

3.1 Propiedades químicas y físicas de la atmósfera de Titán

Composición química de la atmósfera de Titán

Las mediciones de Huygens obtenidas durante el descenso (Raulin, et al., 2008) permitieron tener un inventario bastante preciso de los elementos químicos presentes en la atmósfera de Titán. Entre los principales elementos encontramos al N_2 con un 98%, seguido del CH_4 con un 1,4% y del H_2, con un 0,1%. Entre los hidrocarburos figuran el etano (C_2H_6) con un 0,001 % y el acetileno (C_2H_2) con un 0,0002%. También se encuentran compuestos orgánicos nitrogenados como el ácido cianhídrico (HCN), con un 0,00001%

2 Aceleración gravitatoria sobre la superficie de la Tierra: 9,81 km s^{-2}.

Llama la atención la total ausencia de oxígeno, lo cual redunda en una atmósfera fuertemente reductora. Los compuestos oxigenados más abundantes son el dióxido de carbono (CO_2) con 1,6 10^{-7} % y el agua (H_2O), con un exiguo 4 10^{-8} %.

En consecuencia, la atmósfera de Titán se asemeja a la de la Tierra en la presencia mayoritaria de N_2, aunque, como veremos, el rango de presiones y temperaturas reinantes en Titán generan una química muy diferente a la terrestre.

Determinando el perfil de densidad, presión y temperatura con HASI

Resulta interesante ver de qué manera se dedujeron las propiedades termodinámicas más relevantes de la atmósfera de Titán a partir de las mediciones de Huygens. En particular, el instrumento HASI se encargó de medir durante la primera etapa del descenso, y de manera indirecta, la densidad atmosférica en función de la altitud $\rho(z)$. En efecto, el acelerómetro a bordo de HASI midió la velocidad vertical en función del tiempo v y la desaceleración debida al rozamiento con la atmósfera de Titán:

$$\frac{dv}{dt}(z) = \frac{Av^2(z)}{2m_H}\rho(z)C_D(z)$$

Luego, utilizando esta expresión y conociendo m_H (masa de la sonda), A (sección transversal), y $C_D(z)$ (coeficiente de rozamiento aerodinámico, dependiente del camino libre de las moléculas y el número de Mach), es posible despejar $\rho(z)$.

Una vez obtenida $\rho(z)$, obtenemos el perfil de presión $p(z)$ en función de la altitud integrando la ecuación de equilibrio hidrostático:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho(z)g(z)$$

Donde *g(z)* es la aceleración gravitacional en función de la altitud. Finalmente, el perfil de temperatura *T(z)* se obtiene asumiendo que se trata de un gas ideal, una aproximación válida por encima de 40 km de altitud.

$$T(z) = \frac{p(z)}{R\rho(z)}$$

donde *R* es la constante de los gases para una atmósfera compuesta mayormente por N_2.

Después de la apertura del paracaídas, y la separación de la cubierta térmica (altura ~155 km), HASI utilizó otros sensores para medir *p(z)* y *T(z)* de manera directa. Por debajo de la tropopausa (~40 km) se utiliza una ecuación de estado de un gas real en la derivación de ρ*(z)* a partir de *p(z)* y *T(z)*.

Los perfiles *p(z)*, *T(z),* ρ*(z)* obtenidos por HASI representan las primeras mediciones in situ de las propiedades de la atmósfera de Titán. En particular, la curva *T(z)* permite diferenciar claramente las distintas capas de la atmósfera: la tropósfera que va desde la superficie hasta aproximadamente 42 km —lugar donde se identifica la tropopausa (70,4 K)—; la estratósfera, que se extiende hasta aproximadamente 250 km (187 K); y la mesopausa, que se ubicaría a aproximadamente 490 km (~152 K). Sobre la superficie, los valores de *p*, *T,* ρ son, respectivamente, 1470 mbar, 93,7 K y ~5 kg m^{-3}.

3.2 El ciclo del metano

En las condiciones de presión y temperatura que se encuentra Titán, el CH_4 condensa como lo hace el agua en la Tierra, mientras, que el H_2 no condensa, al igual que el CO_2 terrestre. Esto ha llevado a plantear que el CH_4 sigue un ciclo similar al del agua en la Tierra (Lunine y Atreya, 2008, Lunine y Lorenz, 2009), aunque con ausencia de vastos océanos de CH_4 como sucede con el agua en la Tierra. Sin embargo, el Radar de Cassini ha detectado en las zonas polares formaciones que podrían ser lagos de metano y etano y cuyos tamaños van del orden del kilómetro al del los cientos de kilómetros.

Por otro lado, el instrumento DISR a bordo de Huygens detectó durante el descenso formas dendríticas de tamaños del orden de los cientos de kilómetros sobre un terreno relativamente joven, sugiriendo que materiales líquidos escurrieron recientemente, probablemente a causa de lluvias torrenciales esporádicas (Tomasko et al., 2005). Lo ocasional de las lluvias a bajas latitudes

parece deberse a la baja cantidad de radiación proveniente del sol (1/1000 de la radiación solar interceptada a 1 UA). En el mismo sentido, GCMS indica que el CH_4 llega a nivel de saturación a 8 km, permitiendo la presencia de nubes y, eventualmente, de lluvia.

Una vez en la superficie, Huygens-GCMS detectó la presencia de CH_4 condensado en la superficie cercana a la sonda (en una humedad ambiente del 45%, Niemann et al. 2005) donde se observaron rocas redondeadas (Tomasko et al. 2005).

Además, observaciones espectroscópicas mostraron grandes áreas de materiales no líquidos e imágenes de radar revelaron que las vastas regiones ecuatoriales oscuras eran en realidad dunas de "arena" compuesta de hielo de agua y materiales orgánicos (Lorenz, et al., 2006).

Respecto a la fuente de la atmósfera, las observaciones de Huygens sugieren que ésta se produce por la liberación de N_2 débilmente atrapado en la corteza. Esto hace pensar que la atmósfera primordial de Titán pudo haber consistido de amonio (NH_3) que por fotólisis pudo haberse transformado en N_2.

En resumen, las principales diferencias entre el ciclo del CH_4 en Titán y el ciclo del agua en la Tierra son las siguientes:

1) *Las temperaturas en Titán son mucho más bajas y por lo tanto el* CH_4 *y el* C_2H_6 *son el elemento líquido.*
2) *Titán no posee un océano global.*
3) *El cociente entre la capacidad de calor latente y la energía solar disponible es mucho mayor en Titán que en la Tierra.*
4) *La tropopausa de Titán no es mucho mas fría que la superficie, permitiendo que el metano suba hasta la estratósfera donde es rápidamente destruido por los rayos ultravioletas.*

Un sistema de dos celdas transportaría el metano desde las regiones ecuatoriales, donde se sitúan las dunas de material orgánico, hacia las regiones polares, donde proveería de líquido a los lagos. En el ecuador, donde existe una humedad relativa del 45%, se formarían nubes de metano que desencadenarían fuertes lluvias erosionando la superficie. La pérdida de metano por fotólisis va a terminar por no ser compensada por las fuentes superficiales, y se espera que finalmente el ciclo terminará.

Otra forma de estudiar la química orgánica en Titán consiste en simular procesos en laboratorio. Entre los productos obtenidos figuran sólidos orgánicos llamados “tholins” que se suponen son equivalentes a los aerosoles encontrados en Titán.

La composición molecular de los tholins de Titán es poco conocida, sin embargo se sabe que están hechos de macromoléculas de estructura irregular que probablemente forman un núcleo que está recubierto por una capa de componentes volátiles condensados. Esta estructura podría explicar la ausencia de volátiles diferentes al CH_4 en la estratósfera y la formación de depósitos de orgánicos en la superficie (por ejemplo en las dunas) por sedimentación de estos aerosoles. A pesar de que Huygens DISR no observó tholins en el sitio de aterrizaje, detectó efectivamente compuestos orgánicos condensados.

3.3. En busca del agua

Una de las mayores incógnitas respecto a la composición química y estructural de Titán es la naturaleza de su corteza y su interior. En particular, nos preguntamos si el agua líquida, una restricción importante para la vida y virtualmente ausente sobre la superficie por períodos prolongados, podría existir de manera permanente por debajo de la capa de hielo superficial. En efecto, distintos modelos predicen que el hielo de agua puede transformarse en líquido a profundidades del orden de los 100 km, dando lugar a una capa acuosa subcortical, pero obviamente, resulta imposible confirmar de manera directa dichas predicciones.

Ahora bien, veamos cómo a partir de las mediciones de Cassini se busca obtener información acerca de la estructura interna de Titán y, si en efecto, existen cuerpos acuosos conductores bajo su superficie.

Estimación del número de Love de Titán mediante las mediciones de Cassini RSS

La información acerca de los interiores planetarios puede ser obtenida a partir de mediciones geodésicas de parámetros globales como el campo gravitatorio y las variaciones en la rotación del cuerpo.

Estas propiedades pueden ser calculadas a partir de experimentos de radio como los que lleva a bordo Cassini en los que se busca medir el desplazamiento frecuencial Doppler de las ondas de radio entre la Tierra y el orbitador,

producto de las perturbaciones del campo gravitatorio del cuerpo —en este caso Titán. Uno de los parámetros más relevantes para intentar resolver el problema de la presencia de líquidos en el interior de un cuerpo es el número de Love de marea (usualmente representado por k_2), relacionado con la variación temporal del término cuadrupolar de la expansión del campo gravitatorio en armónicos esféricos.

En efecto, recientes modelos del interior de Titán incluyendo simulaciones de la evolución térmica predicen que esta luna alberga un océano de agua y amonio subsuperficial. En principio, la medición de k_2 es posible porque los momentos cuadrupolares varían periódicamente con el período de rotación debido a la excentricidad de la órbita de Titán.

Hasta el momento, las mediciones de Cassini RSS han permitido determinar los coeficientes de grado 2 con bastante precisión, permitiendo afirmar que el interior de Titán está muy cerca del equilibrio hidrostático. Esto podría ir en contra de la hipótesis de que existe un campo magnético intrínseco generado en el interior de la luna (volveremos a este tema más adelante).

Sin embargo, el número de pasajes de Cassini cerca de Titán dedicados a RSS (hasta ahora, se cuenta sólo con 4) es insuficiente para determinar k_2 más allá de los errores, y por consiguiente la cuestión del la presencia de un océano sigue abierta (Rappaport et al., 2008). Estos mismos modelos indican que se requieren al menos 5 pasajes para hacer tal determinación.

Por otro lado, la rotación no sincrónica de Titán no ha sido demostrada hasta el momento. Si, ésta existiera, implicaría que existe un océano líquido bajo una corteza poco espesa. Si no existe, sólo la determinación de k_2 permitirá deducir la presencia de tal océano.

Otra manera de detectar agua subsuperficial: Campo magnético inducido

Uno se pregunta qué tiene que ver el campo magnético con el agua, un elemento neutro. Pues bien, el agua salada es un buen conductor y por lo tanto es capaz de albergar corrientes.

A diferencia de la Tierra o Saturno, Titán no posee un campo magnético intrínseco capaz de generar una magnetósfera propia ($M_{Titán}$ = momento bipolar magnético $< 2x10^{21}$ Gauss cm^3, contra $M_{Tierra} \sim 7{,}9\ 10^{25}$ Gauss cm^3 para la Tierra). Esta propiedad permite sin embargo, una forma alternativa de deducir la presencia de un cuerpo conductor subsuperficial que consiste en medir el campo magnético de inducción $\mathbf{B}_{ind}$ generado al exponer la superficie de Titán

a un campo magnético externo (en este caso, el de Saturno, $\mathbf{B}_{sat}$) que sea variable en el tiempo.

Para ello veamos la forma en la que Titán interactúa con el plasma de Saturno. Titán orbita Saturno a una distancia de 20 radios planetarios (el radio de Saturno mide 60.330 km) con un período de aproximadamente 16 días. Esto sitúa al satélite dentro de la magnetósfera del planeta, es decir, la región dominada por el campo magnético y el plasma planetarios y cuyo límite externo es la llamada 'magnetopausa' (Figura 1). Ahora bien, el plasma y el campo magnético rotan en sentido directo con el planeta una vez cada 11 horas, por lo que Titán está expuesto a un 'viento' de plasma magnetizado que fluye con una velocidad del orden de 100 km/s. En ausencia de un campo magnético capaz de generar un obstáculo, este viento interactúa directamente con la atmósfera de Titán, que, ionizada en sus capas superiores por acción de la radiación solar da lugar a una ionósfera del lado diurno. En consecuencia, el tipo de interacción dependerá del ángulo que forman el flujo de plasma de Saturno (siempre tangente a la órbita) y la dirección de los fotones solares. Ese ángulo es el tiempo local de Titán respecto a Saturno (SLT). Medido en horas, este ángulo vale 00:00 cuando Titán está detrás de Saturno, 06:00 cuando está al Oeste, 12:00 cuando está entre Saturno y el Sol, y 18:00 cuando se sitúa al Este del planeta.

En la región cercana a 06:00 SLT, la dirección del flujo de plasma de Saturno y la dirección de la radiación ionizante son antiparalelas. En esta geometría, el campo externo puede penetrar (difusión) las capas de la atmósfera poco ionizada de Titán (hemisferio nocturno) hasta su superficie y más allá. De existir entonces un cuerpo conductor subterráneo, cualquier variación temporal de $\mathbf{B}_{sat}$ generará un campo eléctrico inducido $\mathbf{E}_{ind}$ según la ley de Faraday,

(1) $$-\frac{\partial \mathbf{B}_{\mathbf{sat}}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{E}_{\mathbf{ind}}$$

que a su vez generará un campo magnético inducido susceptible de ser medido por el magnetómetro de Cassini.

Ahora bien, en cercanías de Titán, y en todo momento, Cassini MAG medirá la superposición de tres campos de distinto origen:

(2) $$\mathbf{B}_{total} = \mathbf{B}_{sat} + \mathbf{B}_{ind} + \mathbf{B}_{int}$$

donde $\mathbf{B}_{sat}$ es el campo de Saturno que envuelve y se apila en frente de Titán como resultado de la interacción con la ionósfera de Titán (campo variable); $\mathbf{B}_{ind}$ es el campo magnético inducido por la presencia de un hipotético cuerpo acuoso subsuperficial (también variable), y $\mathbf{B}_{int}$ es el campo magnético intrínseco generado en el núcleo.

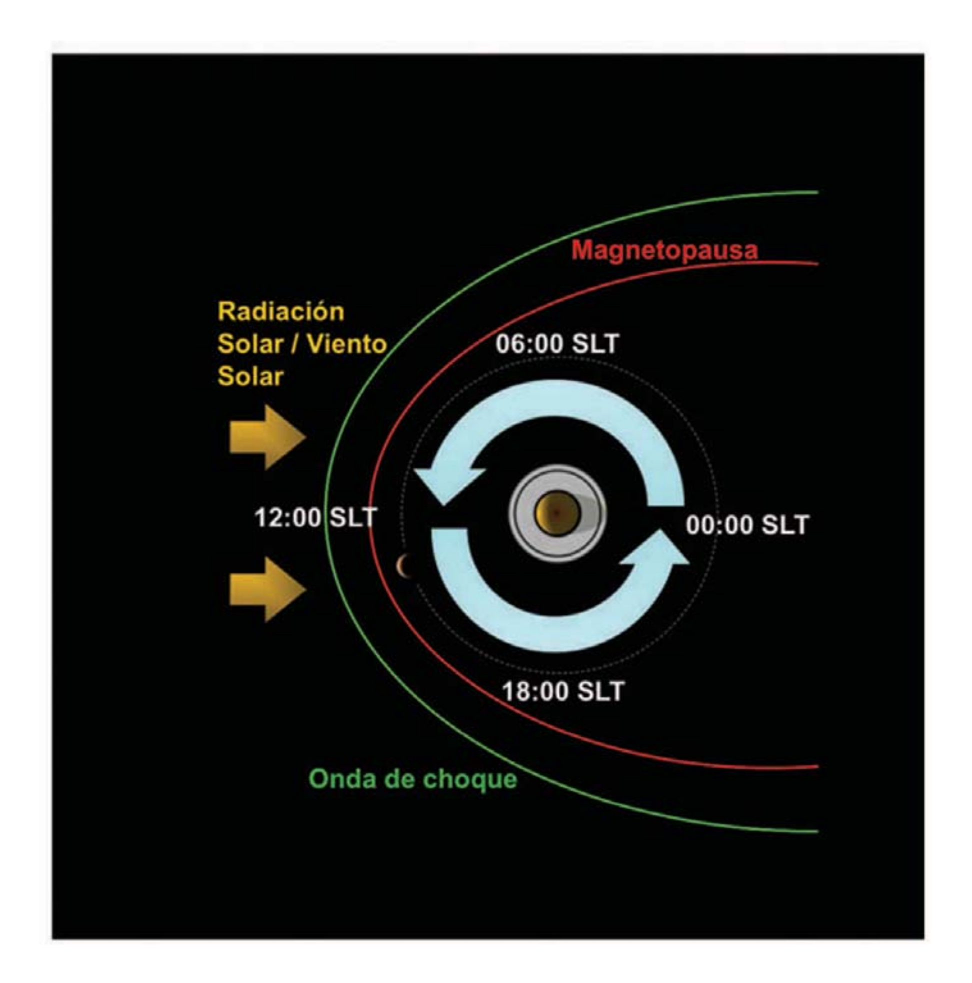


Fig. 1 - Esquema que representa la magnetósfera de Saturno (región dentro de la curva roja, la magnetopausa) y Titán, que en órbita a 20 radios planetarios, se enfrenta al plasma de la magnetósfera que rota con el planeta (flechas celestes). La dirección del plasma incidente y la de los fotones solares (flechas doradas) va variando a lo largo de la órbita y es función del tiempo local de saturno (SLT). Así, las dos direcciones son antiparalelas a 06:00 SLT y paralelas a 18:00 SLT.

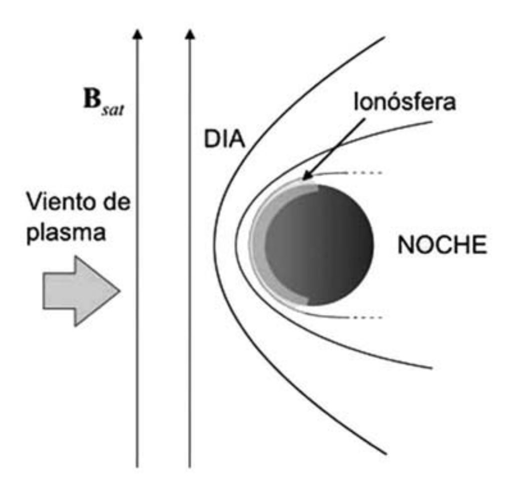


Fig. 2 - Esquema que describe la geometría de la interacción entre el campo magnético de Saturno y Titán a 18:00 horas de tiempo local (SLT). En este sector de la órbita de Titán, el plasma magnetosférico que transporta el campo magnético del planeta incide en el hemisferio diurno, donde la ionósfera (en amarillo) impide que $\mathbf{B}_{sat}$ llegue a la superficie. En esta configuración se mide el campo intrínseco de Titan, $\mathbf{B}_{int}$, si es que posee uno.

A fin de despejar $\mathbf{B}_{ind}$, a partir de $\mathbf{B}_{total}$ es necesario primero calcular $\mathbf{B}_{int}$, por más pequeño que sea. Para ello y asumiendo que $\mathbf{B}_{int}$ es constante, se intentará hacer que Cassini sobrevuele una región donde $\mathbf{B}_{sat}$ y $\mathbf{B}_{int} \sim 0$. Esta región es la baja ionósfera de Titán (por debajo de 900 km de altitud) en la porción de la órbita donde el plasma de Saturno incide sobre el hemisferio diurno. Debido a la alta conductividad de la ionósfera que se interpone, $\mathbf{B}_{sat}$ se verá imposibilitado de penetrarla, dejando esta región libre de campo externo. Al mismo tiempo, el hecho de que $\mathbf{B}_{sat}$, no llegue a la superficie implicará la no generación de $\mathbf{B}_{ind}$, mediante inducción. Por lo tanto, a 18:00 hs SLT tendremos $\mathbf{B}_{total} \approx \mathbf{B}_{int}$ y entonces podremos utilizar este valor en la ecuación (2) para obtener $\mathbf{B}_{ind}$ realizando la medición en el sector de la órbita de Titán donde es máximo: es decir alrededor de 06:00 SLT, en el hemisferio nocturno. Cabe aclarar que el término restante, $\mathbf{B}_{sat}$, puede ser medido lejos de Titán donde se satisface la aproximación $\mathbf{B}_{total} \approx \mathbf{B}_{sat}$.

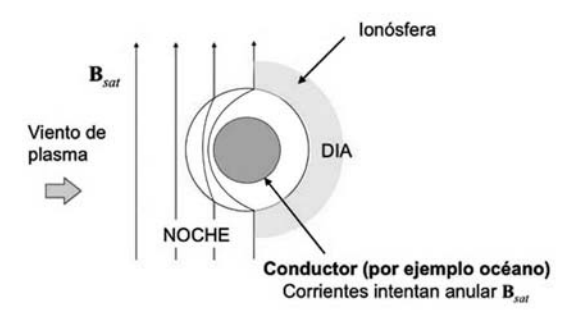


Fig. 3 - Esquema que describe la geometría de la interacción entre el campo magnético de Saturno y Titán a 06:00 horas de tiempo local (SLT). En este sector de la órbita de Titán, el plasma magnetosférico que transporta el campo magnético del planeta incide en el hemisferio nocturno, donde la ausencia de ionósfera (en amarillo) permite que $\mathbf{B}_{sat}$ llegue a la superficie y sea capaz de generar un campo inducido si existe un conductor en su interior.

Hasta ahora, Cassini ha encontrado evidencia de que el campo magnético de Saturno penetra hasta la superficie de Titán. Sin embargo, la geometría orbital no ha permitido hasta el momento hacer mediciones fehacientes de $\mathbf{B}_{int}$ ni de $\mathbf{B}_{ind}$. Se espera que en junio de 2010, Cassini vuele a una altitud de 880 km por debajo de la ionósfera de Titán a 18:00 y pueda así determinar $\mathbf{B}_{int}$ como paso previo a una medición de $\mathbf{B}_{ind}$.

4. Vida en Titán: ¿Una bioquímica basada en hidrocarburos?

Como se esperaba, la sonda Huygens no pudo identificar signos de vida macroscópica en Titán durante su descenso y su permanencia en la superficie. Sin embargo, la ausencia de ésta no se puede descartar definitivamente. Por supuesto, tampoco se puede descartar la presencia de vida microscópica.

Para una vida de tipo terrestre, la ausencia de agua líquida sobre la superficie de Titán es un factor fuertemente limitante. Sabemos bien que en la Tierra, el agua es el solvente por excelencia, producto de una estructura polar que la vuelve también esencial para la vida. Sin embargo, los hábitats para la

vida en Titán pueden ser solventes no polares, como el metano y el etano líquido, e incluso éstos podrían formar emulsiones con pequeñas gotas de agua líquida, lo cual llevaría a una aislación Darwiniana. La vida en tal ambiente acuoso estaría supeditada a las mismas restricciones que la que se desarrolla en el agua. Además, trabajos en laboratorio muestran que las gotas de agua en solventes hidrocarburíferos son compartimientos celulares para la evolución (Tawfik and Griffiths, 1998).

Es en ese sentido que la búsqueda de un hipotético cuerpo acuoso subsuperficial, probablemente enriquecido con material orgánico resulta prioritario para Cassini. Este hábitat sería ciertamente más 'benigno' para una vida de tipo terrestre (Raulin, 2008). Por otro lado, cálculos de la energía disponible en reservorios internos serían marginalmente suficientes para mantener un sistema viviente (Fortes, 2000).

Un aspecto relacionado con la posibilidad de vida de tipo terrestre en Titán es el estudio del origen del CH_4 en su superficie y atmósfera. Como menciona Raulin (2008), varios autores han especulado con el hecho de que éste sea producto de actividad biológica. Ahora bien, las observaciones en la Tierra muestran que esto implicaría una presencia importante de isótopos livianos del carbono, como ^{12}C respecto a otros como el ^{13}C (los valores típicos de $^{12}C/^{13}C$ se sitúan por encima de 89). Las mediciones de Huygens GCMS indican un valor para $^{12}C/^{13}C$ de 82 (Niemann et al., 2005), lo cual indica que, al menos para los valores terrestres, el metano en Titán no sería de origen biológico.

¿Pero qué hay de las formas de vida no terrestres? Las observaciones de Cassini/Huygens muestran que Titán puede proveer un ambiente capaz de generar una química prebiótica e incluso una bioquímica, basada en hidrocarburos. Ahora bien, antes que nada, sería necesario un elemento líquido estable ya que la fase líquida facilita las reacciones químicas. En tanto solvente, un líquido permite que los reactivos disueltos se encuentren a tasas más altas que en un sólido.

Benner et al. (2008) se preguntan por qué no usar directamente los hidrocarburos líquidos en Titán como un solvente para la vida. De hecho, los solventes orgánicos presentan algunas ventajas respecto del agua desde el punto de vista biológico. Veamos algunas de ellas:

- La experiencia muestra que la reactividad orgánica en solventes orgánicos no es menor que en agua; de hecho se piensa que muchas enzimas catalizan reacciones teniendo sitios activos no acuosos.

- Los solventes orgánicos presentarían condiciones más favorables para el armado de estructuras supramoleculares a partir de puentes de hidrógeno que en el agua. Así, en un medio solvente de CH_4 una forma hipotética de vida podría usar más puentes de hidrógeno a fin de tener la fuerza suficiente para las bajas temperaturas reinantes en Titán.
- Otro aspecto interesante de los hidrocarburos es que éstos pueden ser hidrocarburofóbicos cuando se asocian a moléculas polares, generando así separación en fases, un elemento importante para lograr aislación Darwiniana. Benner et al. mencionan como ejemplo el caso del acetonitrilo (C_2H_3N/CH_3CN) y hexano (C_6H_{14}).
- La reactividad del agua hace que se destruyan especies orgánicas hidrolíticamente inestables. Así, una hipotética forma de vida viviendo en un océano de hidrocarburos no debería preocuparse tanto por la deaminación[3] hidrolítica de sus nucleobases, y podría guiar reactividad más fácilmente que la vida en el agua. Esto es sabido por los químicos orgánicos, quienes prefieren solventes no acuosos al agua como medio para llevar a cabo reacciones orgánicas en laboratorio.

En resumen y nuevamente citando a Benner et al. (2008), Titán reúne criterios mínimos para la vida:

- Desequilibrio termodinámico.
- Posee abundantes heteroátomos y moléculas que contienen carbono.
- Su temperatura es suficientemente baja para permitir un amplio rango de enlaces, covalentes y no covalentes.
- Además ofrece otros recursos útiles para catálisis necesarias para la vida, incluyendo metales y superficies.

Sin embargo, asegurar de que la vida emergió o existe allí es todavía prematuro. Por otro lado, como comenta Lunine (2009), la presencia de vida en Titán, demostraría un origen biológico independiente del terrestre y por lo tanto el hecho de que la vida sería más común de lo que imaginamos.

Por ahora, sólo tenemos a Cassini/Huygens para intentar contestar algunas preguntas periféricas. Lamentablemente, el atractivo de otra luna alrede-

---

3 Los cambios químicos más comunes de una base son la depurinación y deaminación. En la depurinación, una purina se pierde del ADN al romperse el enlace entre la base y el azúcar. Al replicarse, el ADN incorporará una base al azar. La deaminación es la eliminación de un grupo amino de una base.

dor de un planeta gigante, como Europa pudo más que las posibilidades de volver a Titán dentro de los planes de NASA y la Agencia Espacial Europea. Sin embargo, no cabe duda que las observaciones de Cassini/Huygens darán lugar a numerosos estudios en el campo de la astrobiología en el futuro.

Referencias

Benner, S.A., Ricardo, A. y Carrigan, M.A. Is there a common chemical model for life in the universe?, *Current Opinion in Chemical Biology*, vol. 8: 672-679, 2004.

Danielson, R.E., Caldwell, J.J., y Larach, D.R., An Inversion in the Atmosphere of Titan, *Icarus*, vol. 20: 437, 1973.

Flasar, F.M., Oceans on Titan?, *Science*, vol. 221: 55-57, 1983.

Fortes, A.D., Exobiological Implications of a Possible Ammonia-Water Ocean inside Titan, *Icarus*, vol. 146 (2): 444-452, 2000.

Hunten, D.M., The escape of H2 from Titan, *Journal of Atmospheric Science*, vol. 30: 726 - 732, 1973.

Kuiper, G.P., Titan: a Satellite with an Atmosphere, *Astrophysical Journal*, vol. 100: 378, 1944.

Lebreton, J-P., Coustenis, A., Lunine J., Raulin, F., Owen, T., y Strobel, D., Results from the Huygens probe on Titan, *Astronomy and Astrophysics Review* vol. 17: 149–179, 2009.

Lellouch, E., Schmitt, B., Coustenis, A., y Cuby, J.-G., Titan's 5-micron lightcurve, *Icarus*, vol. 168 (1): 209-214, 2004.

Lindal, G.F. et al., The atmosphere of Titan - an analysis of the Voyager 1 radio occultation measurements, *Icarus*, vol. 53: 348-363, 1983.

Lorenz, R. D., et al., The Sand Seas of Titan: Cassini RADAR Observations of Longitudinal Dunes, *Science*, vol. 312 (5774): 724-727, 2006.

Lunine, J.I., Saturn's Titan: A Strict Test for Life's Cosmic Ubiquity, *Proceedings of the American Philosophical Society*, in press, 2009.

Lunine, J.I., y Atreya, S.K., The methane cycle on Titan, *Nature Geoscience*, vol. 1: 159-164, 2008.

Lunine, J.I., y Lorenz, R.D., Rivers, lakes, dunes, and rain: crustal processes in Titan's methane cycle, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 37: 299-320, 2009.

Massachussets Institute of Technology Open Course Ware (http://www.ocw.mit.edu)

Niemann, H.B., Huygens probe gas chromatograph mass spectrometer: the tmosphere and surface of Titan, *Nature*, vol. 438: 779-784, 2005.

Número especial dedicado a Cassini, Space Science Reviews, vol. 115 (1-4), 2004.

Rappaport, N.J., et al., Can Cassini detect a subsurface ocean in Titan from gravity measurements?, *Icarus*, vol. 194 (2): 711-720, 2008.

Raulin, F., Atrobiology and habitability of Titan, *Space Science Reviews*, vol. 135: 37-48, 2008.

Strobel, D.F., The Photochemistry of Hydrocarbons in the Atmosphere of Titan, *Icarus*, vol. 21: 466, 1974.

Tawfik y Griffiths, Man-made cell-like compartments for molecular evolution, *Nature Biotechnology*, vol. 16: 652-656,1998.

Tomasko M.G., et al., Rain, wind and haze during the Huygens probe's descent to Titan's surface, *Nature*, vol. 438: 765-778, 2005.

Yung, Y.L., Allen, M., y Pinto, J.P., Photochemistry of the atmosphere of Titan- comparison between model and observarions, *Astrophysics Journal Supplement Series*, vol. 55: 465-506, 1984.

Capítulo 9

Las huellas de la vida: caracterización remota de mundos habitables y habitados

Antígona Segura

Resumen Este capítulo revisa los elementos con los que contamos para caracterizar planetas habitables. En este momento se encuentran en el espacio instrumentos capaces de detectar planetas de tamaño similar al nuestro girando alrededor de otras estrellas. En la siguiente década una nueva generación de instrumentos nos permitirá caracterizar mundos potencialmente habitables a partir de su espectro. Para diseñar esas misiones e interpretar sus posibles resultados necesitamos aprender a distinguir un mundo habitado de uno que no lo es. Nuestra primera aproximación es estudiar el mundo habitado que conocemos. De esta forma hemos definido las "bioseñales", características generadas por la vida que pueden ser detectadas de manera remota. Para identificarlas debemos tomar en cuenta el contexto geológico en el que se encuentran. Entre las bioseñales que hemos identificado hasta ahora se encuentran el oxígeno y su derivado, el ozono. También podríamos detectar la absorción generada por pigmentos fotosintéticos. Uno de los problemas que debemos resolver es determinar cuáles serían las bioseñales para planetas habitados donde la atmósfera está compuesta de bióxido de carbono y nitrógeno.

Abstract In this chapter the means currently available to characterize habitable planets are reviewed. Nowadays, several instruments in space are capable of detecting Earth-size planets around other stars. In the next decade, a new generation of instruments will allow the characterization of potentially habitable worlds based on their spectra. The design of those missions and the interpretation of their results depends on our knowing how to distinguish a habitable planet from one that is not. A first approximation is the study of the only inhabited world yet known. Those features produced by life which can be remotely detected are defined as "biosignatures". In

Antígona Segura (✉)

Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior C.U. A.Postal 70-543 04510, México D.F., México
Virtual Planetary Laboratory

NASA Astrobiology Institute

antigona@nucleares.unam.mx

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 195 - 222, © 2010 UNESCO-Montevideo.

order to identify them, the geologic context has to be taken into account. Among the biosignatures identified, there is oxygen and its byproduct, ozone. The absorption generated by photosynthetic pigments could also be detected. One of the problems yet to be solved is the determination of biosignatures in inhabited planets whose atmospheres are composed of carbon dioxide and nitrogen.

1. Introducción

La búsqueda de vida en planetas alrededor de otras estrellas se inició en 1959 cuando Cocconi y Morrison (1959) publicaron un artículo donde proponían que era posible detectar señales provenientes de una civilización extraterrestre utilizando un radiotelescopio. De manera independiente, en ese mismo año, Frank Drake inició el Proyecto Ozma usando el radiotelescopio de Green Bank.

En ese entonces poco sabíamos de las propiedades de planetas alrededor de otras estrellas, por lo que la búsqueda de vida en otros mundos sólo era posible si una civilización tecnológica estaba enviando una señal que nos indicara su presencia.

En 1995 Mayor y Queloz detectaron el primer planeta en órbita alrededor de una estrella similar al Sol. Una estrella "similar al Sol" tiene una masa entre 0,5 y 2 veces la masa solar ($M_{\odot}$). Los planetas alrededor de otras estrellas son llamados exoplanetas. A la fecha se han encontrado cerca de 500 exoplanetas (http://exoplanet.eu/), lo que nos ha permitido realizar las primeras estadísticas sobre la frecuencia y características de estos cuerpos.

Hasta ahora la mayoría de los planetas detectados son similares a Júpiter, es decir planetas gaseosos cientos de veces más masivos que la Tierra. Esto se debe a nuestras limitaciones tecnológicas, pues los planetas menos masivos son más difíciles de detectar; pero estas limitaciones se modificarán sustancialmente gracias a una nueva generación de instrumentos. Kepler, lanzado en marzo de 2009, es el primer telescopio capaz de detectar mundos potencialmente habitables. Para la siguiente década las agencias espaciales de los Estados Unidos (NASA) y de Europa (ESA), planean construir instrumentos capaces de caracterizar mundos habitables. Las misiones Darwin y Terrestrial Planet Finder (Buscador de Planetas Terrestres) serán capaces de obtener el espectro de planetas potencialmente habitables, a partir de los cuales esperamos determinar cuáles mundos se encuentran habitados.

Para llevar a cabo esta empresa se requiere que los científicos determinemos qué características debe tener un planeta habitable y cuáles son las señales de la vida que podemos detectar de manera remota. La finalidad de este capítulo es comprender qué requiere un mundo para ser habitable y cómo podremos detectar vida en planetas alrededor de otras estrellas a partir de lo que conocemos de la vida en la Tierra.

2. La Tierra como planeta habitable

Si bien sólo tenemos un ejemplo de vida, basado en carbono y agua, la variedad de mundos que nos rodea puede ayudarnos a comprender cuál es la diferencia entre un mundo habitable y uno que no lo es. En 1993, Carl Sagan y varios colegas publicaron los resultados de un experimento en el que la Tierra fue observada con la sonda Galileo como un planeta más. Observado así, nuestro mundo posee tres características relevantes según los resultados del experimento:

1. Oxígeno (O_2) gaseoso abundante.
2. Metano (CH_4) atmosférico en desequilibrio termodinámico extremo.
3. Pigmento superficial ampliamente distribuido con una absorción marcada en el límite rojo del espectro visible.

Cada una de estas características está relacionada con el hecho de que nuestro planeta se encuentra habitado.

2.1. Oxígeno

Hace 4×10^9 años, la atmósfera de nuestro planeta estaba compuesta principalmente por bióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2). En ese entonces se producían cantidades mínimas de oxígeno debido a la separación de moléculas de agua por radiación ultravioleta (fotólisis). Las evidencias geológicas nos indican que hace unos $2{,}5\times10^9$ años el oxígeno comenzó a elevarse hasta alcanzar el 21% de concentración en la atmósfera terrestre. Los detalles de este proceso aún siguen en debate pero lo que sí es seguro es que quienes produ-

jeron el oxígeno atmosférico fueron microorganismos fotosintéticos llamados cianobacterias.

2.2. Metano

En la troposfera terrestre el metano se destruye por la siguiente cadena de reacciones químicas:

$$O_2 + h\nu\ (\lambda < 290\ nm) \rightarrow O + O \quad (1)$$
$$O_2 + O \rightarrow O_3 \quad (2)$$
$$O_3 + h\nu\ (\lambda < 310\ nm) \rightarrow O_2 + O(^1D) \quad (3)$$
$$O(^1D) + H_2O \rightarrow 2\ OH \quad (4)$$
$$CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + H_2O \quad (5)$$
$$CH_3 + O_2 + M \rightarrow CH_2O_2 + M \rightarrow \ldots \rightarrow CO\ (o\ CO_2) + H_2O \quad (6)$$

Una vez que el metano es destruido por este mecanismo no existe una reacción química que lo restituya a la atmósfera. Si la producción de este compuesto desapareciera, todo el metano atmosférico sería destruido en unos 10 a 12 años. Actualmente se producen $5{,}35\times10^{14}$ gr/año de metano (Houghton et al. 1994) que mantienen una concentración promedio de 1,6 partes por millón por volumen (ppmv). Las fuentes no biológicas representan menos del 5% de la producción total de CH_4, por lo que prácticamente es la vida quien produce el metano presente en la atmósfera.

2.3. Pigmento superficial

Las mediciones de la sonda Galileo mostraron una clara diferencia entre el espectro reflejado entre 0,5 y 1 micras por la superficie del Amazonas y el desierto de Atacama.

La reflectancia del desierto tiene una dependencia lineal con la longitud de onda, mientras que la selva del Amazonas presenta una absorción marcada entre las 0,6 y 0,74 micras. Esta absorción es producida por la clorofila, uno de los pigmentos usados por las plantas para recolectar fotones.

2.4. Generalizando nuestro mundo habitable

El experimento realizado por la sonda Galileo nos muestra que la Tierra presenta al menos tres características que son producto de la vida y que pueden ser detectadas remotamente. La comparación del espectro de nuestro planeta

con mundos similares, nos muestra cómo diferenciar un mundo habitable de uno que no lo es. Las Figs. 1 y 2 presentan los espectros de Venus, Marte y la Tierra en el visible (VIS) y cercano infrarrojo (NIR) y en el infrarrojo (MIR). En el visible y cercano infrarrojo (Figura 1) los espectros de Venus y Marte están dominados por el bióxido de carbono, mientras que en el espectro terrestre el que produce la mayor parte de las bandas de absorción es el vapor de agua atmosférico. La tenue atmósfera de Marte permite recibir la luz reflejada directamente por la superficie del planeta, compuesta principalmente por óxidos de hierro.

En el infrarrojo medio (Figura 2) el espectro de Venus presenta la absorción de dióxido de azufre (SO_2), un compuesto que se diluye fácilmente en agua, por lo que su presencia nos indica que el agua es escasa en ese planeta. En el espectro de la Tierra el metano terrestre produce una señal muy débil, sin embargo el derivado del oxígeno, el ozono (reacciones 1 y 2), muestra una banda de absorción prominente en las 9,6 µm. Marte tiene un espectro dominado por el CO_2 con trazas de agua.

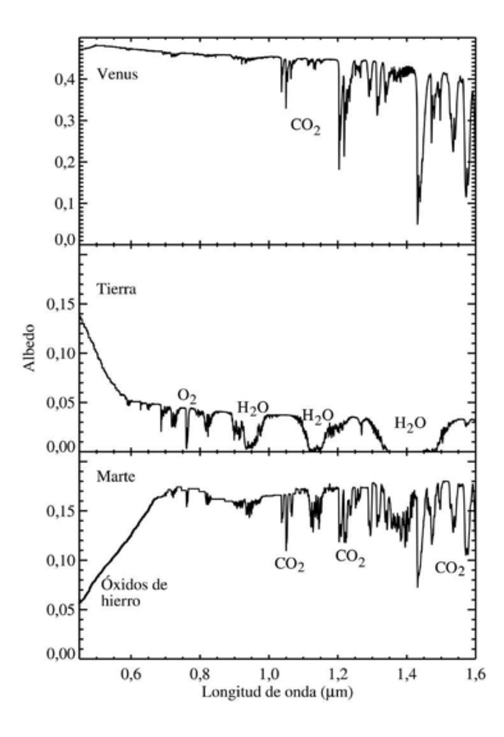


Fig. 1 - Espectros sintéticos de Venus, Tierra y Marte en el visible e infrarrojo cercano generados por el Virtual Planetary Laboratory (VPL) (*Fuente:* V.S. Meadows, U. Washington).

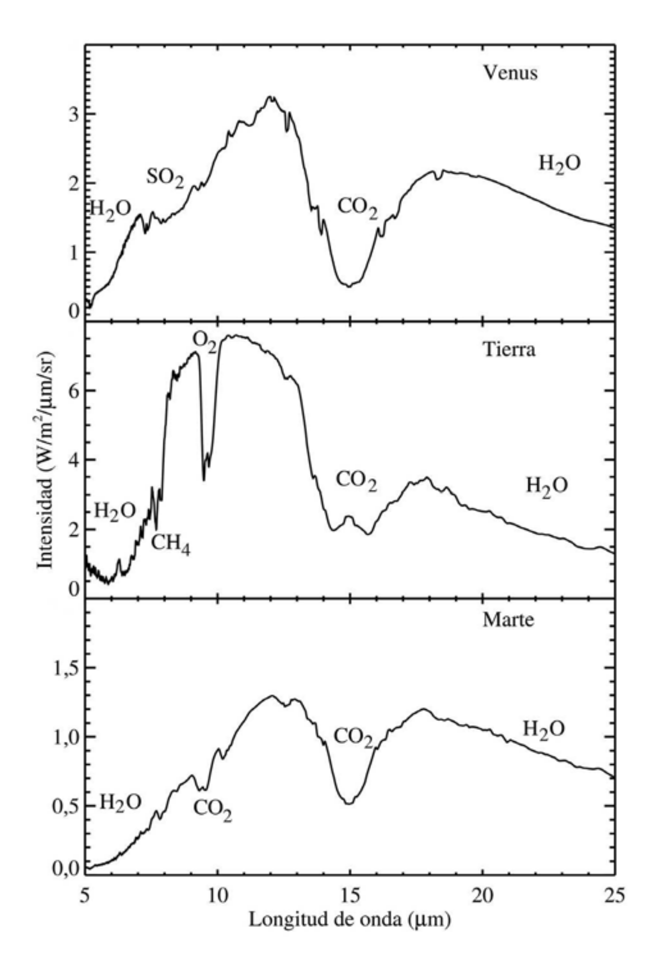


Fig. 2 - Espectros sintéticos de Venus, Tierra y Marte en el infrarrojo medio generados por el Virtual Planetary Laboratory (VPL) (*Fuente:* V.S. Meadows, U. Washington).

La combinación de la información de ambas regiones del espectro (visible e infrarrojo) nos permite deducir algunas de las propiedades de los tres planetas. Los tres mundos contienen agua y bióxido de carbono, sin embargo las concentraciones de estos compuestos son muy distintas. El bióxido de carbono indica que los tres planetas tienen atmósfera, aunque la de Marte es muy tenue y la de Venus muy seca. Sólo la Tierra posee una atmósfera y agua abundante, lo cual la distingue como un mundo habitable, mientras que el O_2 nos indica que es un mundo habitado. El vapor de agua de la atmósfera terrestre proviene de una fuente continua, el agua líquida en la superficie. Para que haya agua líquida el planeta debe tener una temperatura y presión superficiales

dentro de cierto rango. La temperatura superficial del planeta es producto de una combinación entre la energía recibida por la estrella alrededor de la cual gira y el efecto invernadero producido por la atmósfera.

El efecto invernadero se produce cuando una atmósfera es transparente a la luz de la región visible del espectro pero es opaca a la luz infrarroja. Así la luz visible proveniente de la estrella atraviesa la atmósfera y calienta la superficie del planeta. El planeta reemite la energía en el infrarrojo, pero ésta es reabsorbida por la atmósfera, calentándola. Los principales gases de invernadero en la Tierra son el CO_2, H_2O y CH_4. Para que la temperatura superficial de un planeta se mantenga por arriba del punto de congelación del agua se requiere entonces, una combinación adecuada entre la atmósfera con gases de invernadero y la energía recibida de la estrella. Esta última depende de la luminosidad de la estrella y de la distancia entre el planeta y la estrella.

La presión para mantener agua líquida también es aportada por la atmósfera, así pues, este es un requisito indispensable para que un planeta tenga una superficie habitable. Para conservar una atmósfera planetaria se necesita el reciclaje de corteza. Esto se debe a que, el bióxido de carbono se combina con el vapor de agua formando ácido carbónico (H_2CO_3) el cual ataca las rocas de silicatos liberando iones de calcio (Ca^{2+}), bicarbonato (HCO_3^{-}) y sílice (SO_2). Estos compuestos son utilizados en la formación de rocas carbonatadas. De esta manera el bióxido de carbono queda atrapado en la corteza planetaria y es removido de la atmósfera. La única forma de liberar el bióxido de carbono es calentando los carbonatos, eso sucede cuando la corteza se destruye como parte del movimiento de las placas tectónicas. Cuando una parte de la corteza se hunde hacia el manto, se funde y parte de ese material regresa a la superficie a través del vulcanismo. Así el bióxido de carbono es liberado de nuevo a la atmósfera. Este proceso es llamado el ciclo de cabonato-silicato y, en nuestro planeta, recicla todo el CO_2 contenido en la atmósfera y océanos en alrededor de 0,5 millones de años (Kasting y Catling, 2003). En nuestro Sistema Solar, la Tierra es el único planeta que presenta placas tectónicas activas, es decir, es el único que recicla su atmósfera. La tectónica de placas necesita que el interior del planeta tenga calor suficiente para que haya zonas de convección en el manto que generen la salida de nuevo material y empujen la corteza del planeta. El agua contenida en la corteza es fundamental en este proceso, pues reduce la viscosidad y permite un eficiente transporte del calor que proviene del manto.

La cantidad de calor que puede retener el interior de un planeta, aumenta con el tamaño de éste. Además, un planeta masivo ayuda a que la atmósfera no

se escape al espacio, como sucedió en Marte. Si bien no hay muchos modelos detallados sobre el tamaño que un planeta debe tener para presentar placas tectónicas activas, se considera en general que el mínimo es de 1 $M_{\oplus}$. El límite máximo para el tamaño del planeta está determinado por la capacidad de retención de su atmósfera. Un planeta muy masivo agregaría una atmósfera enorme, tal como los planetas gaseosos de nuestro Sistema Solar. En este caso la masa máxima que puede tener un planeta para no convertirse en un gigante gaseoso es de 10 $M_{\oplus}$.

3. Habitabilidad planetaria

A partir de lo que hemos aprendido de nuestro planeta podemos decir que las características de un planeta habitable son:

1. Recibe suficiente energía del Sol para que su atmósfera pueda mantener la temperatura superficial por arriba del punto de congelación del agua.
2. La atmósfera mantiene la presión requerida para que el agua esté líquida.
3. Contiene agua.
4. Dinámica de placas tectónicas que reciclan la atmósfera.
5. Tiene la masa adecuada para retener su atmósfera y mantener la dinámica de placas tectónicas.

Las tecnologías actuales nos permiten determinar la masa y radio planetarios y la distancia entre la estrella y su planeta. La energía recibida por el planeta puede ser calculada fácilmente conociendo la luminosidad de la estrella alrededor de la cual gira y la distancia entre dicha estrella y su planeta. En un futuro tendremos nuevos instrumentos que nos permitirán medir el espectro reflejado y emitido por un planeta, de forma que podremos conocer la composición de su atmósfera —si es que la tiene—, algunas características de su superficie y detectar vida, si ésta produce una señal global. La razón de este requerimiento es que nuestros instrumentos sólo podrán medir el espectro promediado del disco, es decir, una combinación de todas las características presentes en el hemisferio observado del planeta. A diferencia del experimento con la sonda Galileo, en el que podíamos distinguir el desierto de Atacama

de la selva del Amazonas, en un espectro promediado veríamos ambas superficies combinadas sin posibilidad alguna de determinar de qué zona del planeta proviene cada característica. En este caso particular, esto limitaría la posibilidad de observar la absorción producida por la clorofila, y en general, cualquier característica que no esté distribuida ampliamente en el hemisferio observado.

Bajo las limitaciones de nuestra tecnología, un mundo como el satélite de Júpiter, Europa, estaría descartado como mundo habitable, pues su espectro no nos da información alguna sobre su habitabilidad y mucho menos de estar habitado. A lo largo de este texto se considerará sólo la habitabilidad superficial de los planetas pues nos estamos concentrando en determinar de forma remota la presencia de vida. Si la vida no produce una característica observable en el espectro de un planeta, entonces no tenemos otra forma de encontrarla.

3.1. La vida como la conocemos

La mayor generalización que podemos hacer sobre la vida de nuestro planeta es que:

1. Está basada en la química del carbono.
2. Necesita agua para trasportar y concentrar nutrientes.
3. Su fuente principal de energía es el Sol (fotosíntesis)
4. Para funcionar utiliza compuestos para realizar sus procesos (metabolismo) generando productos de desecho.

El punto 4 es el más importante para la detección remota de vida pues en algunos casos no hay ningún otro mecanismo natural para producir los compuestos que resultan como deshecho de los procesos de la vida, como el clorometano (CH_3Cl); y en otros casos los compuestos que la vida desecha también son producidos por otros fenómenos pero con mucha menor abundancia (CH_4). Es esta observación la que sustenta la posibilidad de detectar vida en forma remota.

4. Bioseñales: caracterización de planetas habitables

La Tierra nos ha dado la primera lección sobre la caracterización de un mundo habitable. En principio, la presencia de una atmósfera y agua abundante

pueden ser determinadas a partir del espectro del planeta. Combinando esto con la distancia entre la estrella y el planeta y el tamaño de éste, podremos determinar si un mundo es habitable.

La presencia de vida en el planeta requiere de la detección de *bioseñales*. Las bioseñales son características que pueden ser detectadas de manera remota y cuya abundancia o presencia sólo pueden ser producidas por la vida (DesMarais et al. 2002). Meadows (2006) identifica tres tipos de bioseñales: atmosféricas, superficiales y temporales. En este texto nos enfocaremos a las bioseñales más estudiadas que son las atmosféricas y superficiales. Las bioseñales temporales estarían relacionadas a cambios estacionales en la biomasa o algún otro proceso de la vida a nivel planetario como la respiración. En el caso de la Tierra el CO_2 y el CH_4 cambian periódicamente debido a los procesos biológicos de los organismos en la superficie terrestre.

4.1. Bioseñales atmosféricas

La vida en la Tierra produce una gran variedad de compuestos que son liberados a la atmósfera. Algunos como el metano y el bióxido de carbono, son también producidos por procesos geológicos, y otros, como el oxígeno y el óxido nitroso son producidos únicamente por la vida. La mejor bioseñal sería una simultánea de dos compuestos producidos por la vida, por ejemplo el metano y el oxígeno (DesMarais et al. 2002). Puesto que en la Tierra presente son estos dos compuestos los que pueden ser identificados en el espectro terrestre y por lo tanto ser utilizados para la detección remota de vida, a continuación los analizaremos con más detalle.

4.1.1. El caso del oxígeno

La vida existió en la Tierra unos mil millones de años antes de que el oxígeno comenzara a elevarse en la atmósfera de nuestro planeta (p. ej. Catling y Claire, 2005), por lo que es posible que la vida surja en otros planetas sin que se desarrolle una atmósfera rica en oxígeno. Pero en el caso de que se detectara oxígeno en un exoplaneta ¿sería posible que éste fuera producido por un proceso no biológico? De hecho sí. Marte por ejemplo contiene $1{,}3\times10^{-3}$ partes por volumen de O_2 en su atmósfera producido por la fotólisis de CO_2 (Carleton y Traub, 1972), sin embargo, si detectáramos un planeta así sería descartado

como planeta habitable por su evidente falta de agua. También es posible que un planeta desarrolle una atmósfera rica en O_2 producto de la fotólisis del agua. Para ello se requiere que el planeta esté en el límite interno de la zona de habitabilidad y que se encuentre en un proceso de evaporación catastrófica producido por un efecto invernadero húmedo o el caso extremo, un efecto invernadero descontrolado. De suceder esto, el O_2 estaría presente sólo por un corto periodo geológico (del orden de 10^8 años) y el planeta resultaría "sospechoso" por encontrarse en el límite interno de la zona de habitabilidad.

Simulaciones numéricas han mostrado que un planeta en la zona de habitabilidad, con agua y una atmósfera rica en CO_2 contendría oxígeno producido por la fotolisis de agua y CO_2 en cantidades mínimas que no serían detectables en su espectro (Segura et al. 2007). Esto significa que si detectáramos un planeta en la zona de habitabilidad de su estrella y el planeta mostrara en su espectro la presencia de agua, bióxido de carbono y oxígeno, este último compuesto sólo podría provenir de procesos biológicos.

4.1.2. El caso del metano

La presencia simultánea de metano y oxígeno se considera una buena bioseñal debido a que, como vimos anteriormente, el O_2 promueve la destrucción del metano y por lo tanto se requiere la producción continua y abundante de éste para que pueda sobrevivir en una atmósfera rica en oxígeno. Sin embargo, esta propiedad no es necesariamente generalizable a planetas alrededor de otras estrellas, donde radiación ultravioleta (UV) destruye menos ozono, produciendo menos $O(^1D)$ y por lo tanto menos OH (ver reacciones 2 a 4). En las siguientes secciones revisaremos el caso particular de las estrellas denominadas enanas M, donde el metano puede ser abundante en una atmósfera rica en oxígeno.

El otro problema con el metano se presenta cuando retrocedemos en el tiempo, durante la época en la que nuestro planeta poseía una atmósfera con abundante CO_2. En este caso una producción reducida de metano (similar a la que se produce abióticamente hoy en día) es suficiente para que este compuesto sea detectable en el espectro terrestre. Durante este periodo, el principal proceso de destrucción del CH_4 atmosférico fue la fotólisis, por lo que su abundancia dependió de la luz ultravioleta recibida por el planeta. Por lo tanto, en un planeta con una atmósfera rica en CO_2 sería difícil discernir si el metano proviene de fuentes biológicas o geológicas pues hasta el momento

desconocemos cuáles son los límites posibles para la producción de metano proveniente de cada una de estas fuentes.

Algo que parece evidente a partir de los casos de estos dos compuestos es la necesidad de analizar el espectro terrestre no sólo en el presente sino en distintas etapas de su evolución.

4.1.3. La Tierra en el tiempo

La Figura 3 muestra el espectro de la Tierra en tres etapas distintas: el Arqueano ($3{,}8\times10^9$ - $2{,}5\times10^9$ años), el Proterozoico medio ($1{,}5\times10^9$ - 1×10^9 años) y el presente.

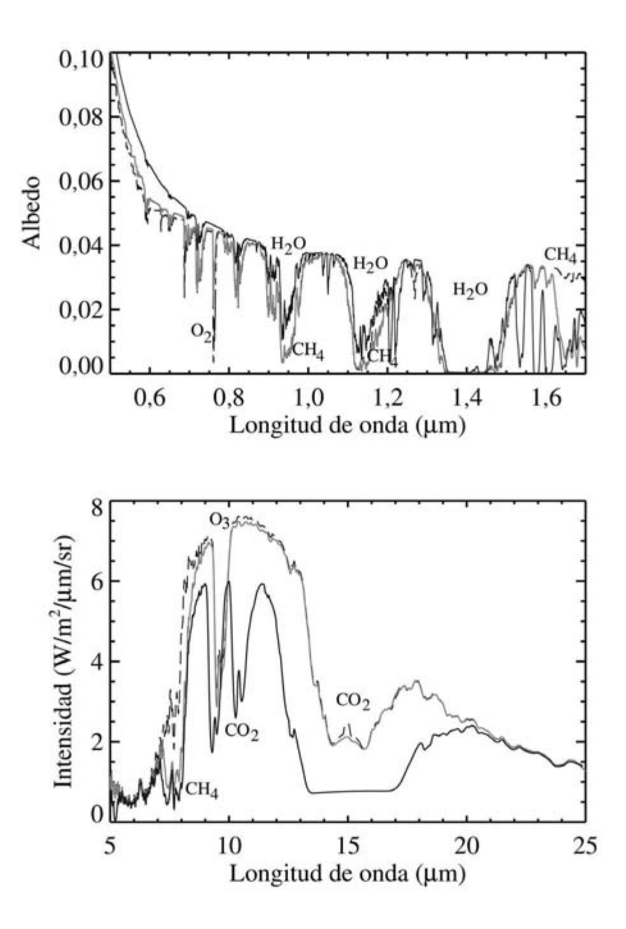


Fig. 3 - Espectro terrestre en tres diferentes etapas: Arqueano (línea negra continua), Proterozoico medio (línea gris) y Presente (línea discontinua) (*Fuente:* Segura et al. 2003, 2005 y 2007).

Tabla 1. Composición atmosférica de la Tierra usada para simular tres períodos geológicos

Periodo	**CO_2 Abundancia por volumen**	**O_2**		**O_3 (cm^{-2})**	**CH_4**	
		Abundancia por volumen[a]	**(cm^{-2})**		**Flujo superficial[b]**	**Abundancia por volumen**
Arcaico[c]	$2{,}00\times10^{-1}$	$1{,}67\times10^{-13}$ $2{,}13\times10^{-3}$	$3{,}63\times10^{19}$	$6{,}79\times10^{14}$	0,033	$4{,}1\times10^{-5}$
Proterozoico Medio	$3{,}35\times10^{-4}$	$2{,}10\times10^{-2}$	$4{,}65\times10^{23}$	$7{,}16\times10^{18}$	8,300	$1{,}0\times10^{-4}$
Presente	$3{,}35\times10^{-4}$	$2{,}10\times10^{-1}$	$4{,}65\times10^{24}$	$8{,}61\times10^{18}$	1,000	$1{,}6\times10^{-6}$

Todas las atmósferas tienen 1 bar de presión atmosférica.

[a] Para el Arcaico la cantidad de O_2 varía de la superficie (mínimo presentado en la tabla) a los 65 km, la altura más alta alcanzada por el modelo (valor máximo en la tabla). Para el Proterozoico Medio y el Presente la abundancia de O_2 es constante en toda la atmósfera (0-65 km)

[b]Flujo superficial normalizado al flujo en el presente ($5{,}54\times10^{14}$ gr/año, Houghton et al. 1995).

[c]En este caso se uso la radiación de la estrella EK Draconis (ver texto)

La Tabla 1 lista la composición de la atmósfera terrestre en cada uno de estos periodos. Para el Arqueano se utilizó la radiación de la estrella similar al Sol, EK Draconis (HD 129333, tipo espectral G1,5V). EK Dra es una estrella joven que, al igual que se piensa sucedió con nuestro sol, emite mayor radiación en el UV que una estrella con sus mismas características pero más vieja. Esta radiación proviene de la interacción del campo magnético de la estrella con una zona de la atmósfera estelar llamada cromosfera. Las estrellas presentan campos magnéticos más intensos en las etapas inmediatamente posteriores a su formación, por lo que la actividad cromosférica es mayor al inicio de la vida de la estrella. La emisión UV de EK Dra es un límite superior de la cantidad de radiación que pudo haber recibido nuestra atmósfera en épocas tempranas (más detalles en Segura *et al.*, 2007). Durante el Arqueano el espectro de nuestro planeta estaba dominado por el CO_2, particularmente en el infrarrojo medio, donde cualquier posible absorción de ozono (9,7 μm) se vería opacada por dos prominentes bandas del CO_2. Tanto en el infrarrojo como en el visible puede apreciarse la absorción del agua y el metano. En el caso graficado, el metano presente en la atmósfera es producido por un flujo superficial de $1{,}6\times10^{13}$ gr/año de metano, similar a la producción abiótica de este compuesto en el presente. Es muy probable que ya hubiera producción de metano biológico hace unos 3000 millones de años (p. ej. Kasting y Catling, 2003) pero éste no resultaría una buena bioseñal dado que, observado en otro planeta, no podríamos saber cuál es la fuente de dicho compuesto. El oxígeno y ozono presentes en la atmósfera del Arqueano (Tabla 1) son producto de la fotólisis del agua y no producen una señal detectable en el espectro. En el Proterozoico medio ya se hace presente la absorción del O_2 y el O_3, así como también la del CH_4 (Segura et al. 2003), éste sería el periodo ideal para la detección de vida en la Tierra pues contiene dos bioseñales. En el presente la absorción del CH_4 es muy débil, pero la presencia de agua y oxígeno (u ozono) serían un buen indicativo de la presencia de vida.

4.1.4. Bioseñales atmosféricas en planetas alrededor de otras estrellas.

La radiación UV determina en gran medida la abundancia de los compuestos atmosféricos, por lo tanto es importante estudiar cómo varían las concentraciones de los compuestos producidos biológicamente con la radiación UV que incide en un planeta. Dependiendo del tipo espectral de la estrella,

su radiación UV puede ser más o menos intensa. Estrellas más masivas que el Sol (tipo espectral F) emiten mayor cantidad de radiación UV que el Sol (tipo espectral G) y a su vez el Sol emite más radiación UV que estrellas menos masivas que él (tipo espectral K). Cuando analizamos a las estrellas más pequeñas, de tipo espectral M, también llamadas enanas rojas, las cosas cambian. El UV recibido por un planeta en la zona de habitabilidad de una enana M puede ser comparable al que recibe la Tierra alrededor del Sol. Esto se debe a que la mayor parte de la energía del interior estelar es transmitida por convección. Los movimientos convectivos del plasma producen fuertes campos magnéticos que interactúan con la cromosfera estelar generando lo que se llama actividad estelar. Uno de los resultados de esta actividad es la emisión de radiación UV. En el caso de las enanas M este proceso va más allá de sus etapas iniciales, pues entre más pequeña es la estrella más grande es la región convectiva en su interior. Así, una enana M puede permanecer activa por largo tiempo. La Figura 4 muestra la comparación entre la radiación UV que recibiría un planeta en la zona de habitabilidad de una estrella F, una estrella G (el Sol) y dos estrellas M. Una de las estrellas M fue obtenida de un modelo que sólo representa la emisión de la fotosfera estelar, el otro espectro es de AD Leonis, una de las estrellas M más activas que se conocen.

La Figura 5 presenta las bandas más relevantes de los espectros de la Tierra alrededor de estrellas con diferentes tipos espectrales. Las características de las estrellas y sus planetas se encuentran resumidas en la Tabla 2. Las bandas de absorción del agua y el oxígeno prácticamente no varían de un planeta a otro por lo que sólo se presentan las bandas del metano, ozono, óxido nitroso y bióxido de carbono. El ozono producido en cada planeta depende de la radiación ultravioleta proveniente de su estrella. De manera directa puede decirse que mayor radiación ultravioleta produce más ozono (Tabla 2), sin embargo mayor abundancia de O_3 no implica una banda de absorción mayor en el espectro planetario. En la Figura 5 puede apreciarse que la banda de O_3 con menor absorción es justamente la del planeta alrededor de la estrella F, el que contiene mayor abundancia de O_3 (Tabla 2). Esto se debe a la estructura de temperatura de la atmósfera, que en el caso del planeta alrededor de la estrella F presenta una zona caliente (~340 K) en su estratosfera alrededor de los 50 km, producida por la absorción de O_3. Como comparación, la temperatura máxima alcanzada en la estratosfera por la Tierra alrededor del Sol es de ~270 K. Las estratosferas de los planetas simulados alrededor de las otras estrellas (K y M) se encuentran por debajo de esta temperatura. En general, la detección de los compuestos en el IR depende no sólo de su abundancia sino también

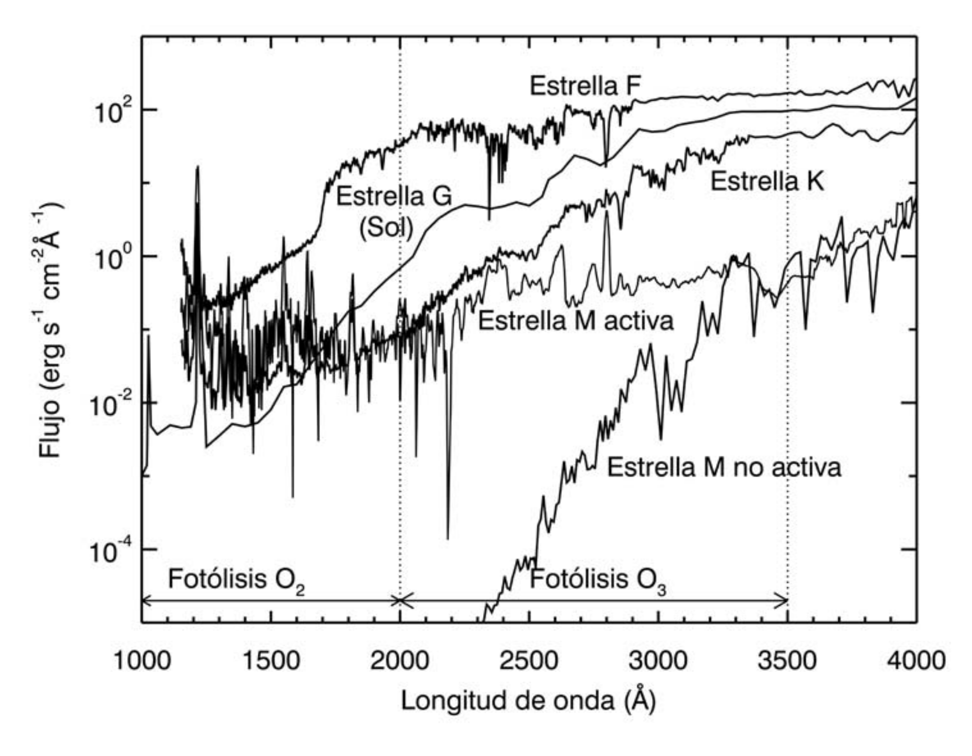


Fig. 4 - Radiación ultravioleta que recibe un planeta en la zona habitable de una estrella tipo F, una estrella G, una estrella M activa y una estrella M no activa (*Fuente* M. Cohen, U. California, Berkeley).

las F

Fig. 5 - Bandas prominentes de CH_4, N_2O, O_3, y CO_2 en el infrarrojo cercano (panel superior) y el infrarrojo medio (panel inferior) en espectros de planetas como la Tierra alrededor de estrellas F, G, K y M. El espectro en el infrarrojo medio está normalizado a un cuerpo negro con temperatura de 288 K. Clave: planeta alrededor de la estrella F: línea negra continua; planeta alrededor de la estrella G: línea negra discontinua; planeta alrededor de la estrella K: línea gris claro; planeta alrededor de la estrella M(AD Leo): línea gris obscuro; planeta alrededor de la estrella M(3100K): punto-raya negra. (*Fuente*: Segura et al. 2003 y 2005).

Tabla 2. Características de estrellas con diferentes tipos espectrales y planetas habitables simulados alrededor de ellas

Estrella			**Planeta**				
Nombre	**Tipo espectral**	**Luminosidad ($L_{\odot}$)**	**Semieje mayor (UA)**	**Profundidad de columna (cm^{-2})**	**Abundancia de compuestos biogénicos**		
				O_3	CH_4	N_2O	CH_3Cl
Sol	G2V	1	1	$8,4\times10^{18}$	$1,6\times10^{-6}$	$3,0\times10^{-7}$	$5,0\times10^{-10}$
σ Bootis	F2V	3,2	1,69	$1,6\times10^{19}$	$1,4\times10^{-6}$	$2,6\times10^{-7}$	$4,5\times10^{-10}$
ε Eridani	K2V	0,27	0,53	$6,6\times10^{18}$	$5,4\times10^{-6}$	$5,9\times10^{-7}$	$1,6\times10^{-9}$
AD Leo	M4V	$2,3\times10^{-2}$	0,16	$4,4\times10^{18}$	$4,6\times10^{-4}$	$1,3\times10^{-6}$	$1,4\times10^{-6}$
Modelo	M5V	$4,4\times10^{-3}$	0,07	$1,2\times10^{18}$	$5,0\times10^{-4}$	$1,2\times10^{-3}$	$5,4\times10^{-7}$

del perfil de temperatura de la atmósfera. Una primera aproximación al perfil de temperatura puede obtenerse de la banda de CO_2 (15 µm), que en su centro

La absorción del metano y óxido nitroso es evidente sólo para los planetas alrededor de las estrellas M en donde la abundancia de OH es menor que la de la Tierra en cinco órdenes de magnitud. Esto se debe a que la fotolisis de O_3 disminuye con respecto a los planetas alrededor de las otras estrellas que reciben mayor radiación UV en las longitudes de onda que fotolizan el ozono (170-350nm). Esto implica una menor producción de O^1D y por ello una disminución en la cantidad de OH (reacciones 3 y 4). Para el caso de la estrella M no activa (T_{eff} = 3100 K), la radiación UV es tan baja que se requirió fijar la cantidad de metano en su planeta para evitar un problema numérico en los modelos. El flujo superficial de metano requerido para producir 500 ppmv en el planeta de la estrella M no activa es 0,21 veces el de la Tierra alrededor del Sol.

4.2. Bioseñales superficiales

La superficie del planeta incide directamente en su reflectividad, por lo que sus efectos pueden ser medidos en la región visible del espectro. Como límites extremos tenemos al hielo —cuyo albedo es cercano a 1— y el océano, con un albedo de alrededor de 0,05. De esta manera, un planeta cubierto de hielo será mucho más brillante que uno cubierto de agua líquida. Los organismos vivos pueden modificar la reflectividad de un planeta al cubrir una parte de la superficie. Este es el caso de las plantas terrestres. Como vimos en el experimento de la sonda Galileo, las plantas tienen una absorción que inicia (o termina) alrededor de los 0,7 µm. El punto de inflexión del espectro debido a la absorción de la clorofila es llamado el borde rojo (red edge) de la clorofila.

Kiang *et al*. (2007a) exploraron las posibles razones por las que los organismos que realizan fotosíntesis oxigénica producen un borde rojo y utilizan a la clorofila como pigmento principal para convertir fotones en energía química. En general, los organismos fotosintéticos usan una gran variedad de pigmentos, cada uno de ellos con picos de absorción que pueden ir de los 0,4 a los 1,07 µm. Las plantas en la superficie usan la clorofila y los carotenoides que absorben entre las 0,40 y 0,72 µm. Las bacterias en cambio, utilizan bacterioclorofilas que absorben entre las 0,7 y 0,9 µm.

Los organismos que producen oxígeno (fotosíntesis oxigénica) utilizan fotones con longitudes de onda entre 0,40 y 0,72 µm. Esto tiene implicaciones para la búsqueda de oxígeno en planetas habitables alrededor de otras estrellas, pues si la estrella no tiene muchos fotones en esta región del espectro (como sucede con las estrellas M), es menos probable que se desarrollen organismos que produzcan oxígeno —que es considerada una de las principales bioseñales atmosféricas.

El estudio de una gran variedad de plantas mostró que: (1) su borde rojo se encuentra entre las dos bandas de absorción del O_2 (0,688 y 0,761 µm), y (2) su máximo de absorción coincide con el máximo de fotones provenientes del Sol que llegan a la superficie terrestre (0,685 µm). En base a estas observaciones Kiang *et al.* (2007b) proponen que los organismos fotosintéticos que habiten planetas alrededor de otras estrellas podrían usar pigmentos para absorber en los rangos de longitud de onda donde la estrella emita mayor cantidad de fotones. Así en el caso de los organismos en un planeta alrededor de una estrella F, las plantas podrían tener colores que van del morado al infrarrojo, mientras que en planetas alrededor de estrellas M los organismos fotosintéticos tendrían mayor cantidad de fotones en la región infrarroja del espectro electromagnético.

4.3. Detectabilidad de las bioseñales

En las Figuras 1, 2 y 3 se presentan espectros de planetas en alta resolución que permiten ver claramente todas las bandas de absorción debidas a varios de los compuestos atmosféricos. En todos los casos la atmósfera se encuentra libre de nubes. En realidad, los instrumentos para la caracterización de exoplanetas tendrán una baja resolución (Figura 6), lo que limitará la detección de las bioseñales. Otro problema es que los instrumentos no lograrán resolver espacialmente el planeta; lo que detectarán será un promedio de la luz emitida por todo un hemisferio del planeta.

Tinetti *et al*. (2006a) realizaron un estudio sobre la variación del espectro promediado del disco de la Tierra en diferentes condiciones de iluminación y geometría. Sus resultados muestran que el mayor problema para la caracterización de la atmósfera y superficie planetarias son las nubes, que disminuyen la columna atmosférica observada debido a su alta reflectividad. Las variaciones en la luz reflejada por el planeta durante su rotación diaria podrían indicar características superficiales, aunque las nubes también afectarían estas observaciones, ya que presentan sus propios patrones de rotación (Ford *et al*., 2001).

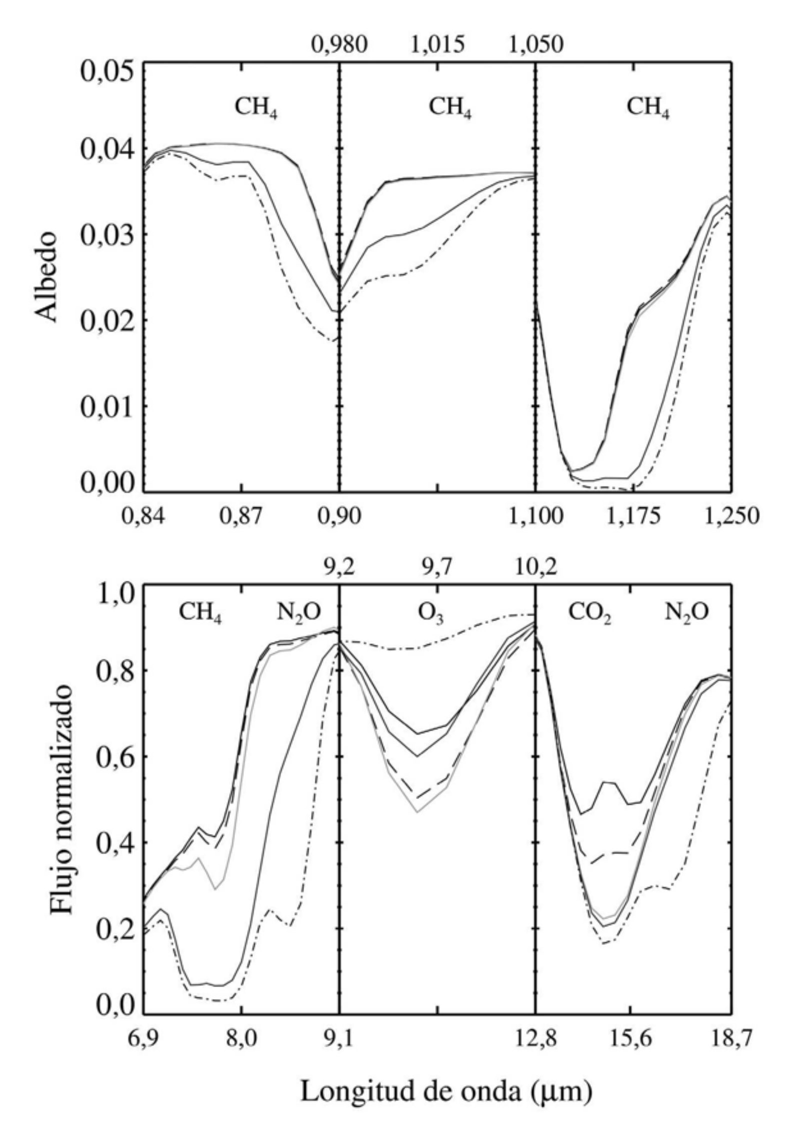


Fig. 6 - Bandas prominentes de CH_4, N_2O, O_3, y CO_2 en espectros de planetas como la Tierra alrededor de estrellas F, G, K y M con las resoluciones planeadas para TPF y Darwin: 70 para el visible e infrarrojo cercano (panel superior) y 25 para el infrarrojo medio (panel inferior). El espectro en el infrarrojo medio está normalizado a un cuerpo negro con temperatura de 288 K. Clave: planeta alrededor de la estrella F: línea negra continua; planeta alrededor de la estrella G: línea negra discontinua; planeta alrededor de la estrella K: línea gris claro; planeta alrededor de la estrella M (AD Leo): línea gris obscuro; planeta alrededor de la estrella M(3100K): punto-raya negra. (*Fuente:* Segura et al. 2003 y 2005).

En el caso del borde rojo y la absorción de la clorofila, sabemos que estas señales son fácilmente distinguibles cuando el instrumento apunta a una zona con alta densidad de plantas (Sagan *et al*. 1993). Sin embargo, esto no es algo que podremos hacer con planetas extrasolares donde contaremos con información promediada del disco planetario. En este sentido las observaciones del brillo de la Tierra (*Earthshine*) son particularmente útiles. El brillo de la Tierra es el reflejo de la luz de nuestro planeta en la región oscura de la Luna. El análisis de este reflejo ha permitido calibrar modelos numéricos que producen espectros sintéticos promediados del disco de la Tierra y analizar la detectabilidad del borde rojo de la clorofila (Tinetti et al., 2006a, 2006b; Montañés-Rodríguez et al., 2006). A partir de su modelo, Tinetti *et al*. (2006b) concluyen que la plantas pueden incrementar el albedo de un planeta hasta en un 50%, y que el borde rojo de la clorofila puede ser detectable bajo ciertas condiciones de geometría e iluminación o bien si las plantas cubren al menos el 20% de la superficie observada y la atmósfera se encuentra libre de nubes.

La caracterización de mundos habitables presenta además el reto de distinguir entre posibles falsos positivos y falsos negativos. La Tierra, por ejemplo, no habría sido reconocida como un mundo habitado (aunque sí habitable) durante sus primeros dos mil millones de años. Hasta la fecha ninguno de los compuestos que se piensa estuvieron presentes en su atmósfera durante esa época resulta una buena bioseñal. Éste sería el caso de un falso negativo. En el otro extremo se encuentran aquellos planetas no habitados donde un proceso no biológico genere una característica semejante a una bioseñal. Esto sucedería en un planeta cuya agua se evaporara de manera catastrófica, como se piensa que sucedió en Venus (ver Sec. *El caso del oxígeno*), donde se generaría una gran cantidad de O_2 por la fotolisis del agua y sin la intervención de ningún proceso biológico (Segura *et al*., 2007).

Un caso interesante sería el de un planeta completamente congelado que se hallara dentro de la zona de habitabilidad. La Tierra ha pasado al menos tres periodos de glaciación global a los que se les denomina “Tierra Bola de Nieve” (Snowball Earth). Se cree que estos periodos duraron unas decenas de millones de años o menos (http://www.snowballearth.org). Estos eventos son geológicamente cortos en duración debido a que la acumulación de CO_2 en la atmósfera acaba revirtiendo la glaciación. Durante estas épocas es posible la acumulación en la atmósfera de O_2/O_3 generados por procesos abióticos (Segura *et al*., 2007). Un planeta como éste presentaría además señales de vapor de agua y CO_2 en su atmósfera. Sería posible determinar que un planeta está congelado globalmente debido a la alta reflectividad del hielo en el espectro

visible y la determinación de la temperatura efectiva del planeta usando la emisión en el infrarrojo medio. Sin embargo, no podría determinarse si se trata de un planeta congelado que no está habitado o, como sucedió en la Tierra, un planeta habitado que pasa por una glaciación global.

4.3.1. Caracterización de planetas por fotometría

Otra forma de estudiar remotamente un exoplaneta es midiendo su luz con filtros de banda ancha por largos periodos de tiempo. Dichos filtros recolectan la luz de regiones determinadas del espectro electromagnético, por ejemplo el filtro U en el sistema de Johnson-Cousins, que mide la luz emitida por un objeto entre los 0,315µm y los 0,385µm. En este caso lo que se mide es la amplitud de las variaciones temporales en uno o varios filtros.

Los planetas exhiben variaciones temporales que contienen información acerca de la superficie de una región, combinada con sus características atmosféricas y posiblemente incluya bioseñales locales (Ford et al. 2001, Seager et al 2005, Montañés-Rodríguez et al. 2006). Dos de las variaciones temporales más significativas en un planeta son debidas a su fase (día/noche) o a cambios estacionales (si el planeta tiene una oblicuidad diferente de cero). El contraste entre las temperaturas de día y de noche indica la presencia o ausencia de atmósfera. En el caso de la Tierra y Venus la variación es mínima, mientras que Marte y Mercurio tienen drásticos cambios de temperatura entre los hemisferios diurno y nocturno. Así, los cambios diurnos se reflejarían en la amplitud de la intensidad del flujo emitido en el infrarrojo medio. En el caso de la Tierra, esta amplitud sería pequeña (Ford et al. 2001), mientras que en un planeta como Marte, la variación sería mucho mayor. La variabilidad fotométrica temporal de un planeta puede ser usada para inferir la presencia de patrones variables en la superficie de un planeta, esto es, nubes (Pallé et al. 2008). La rotación de un planeta puede ser determinada con una exactitud del 2%. A partir de esta medición se pueden analizar las curvas de luz para estudiar propiedades regionales de la superficie o la atmósfera del planeta (Pallé et al. 2008).

5. Búsqueda de mundos habitables

5.1. Las misiones

Hasta la fecha (septiembre del 2009) se han encontrado cerca de 500 planetas y la lista crece mes con mes. La mayoría de ellos son planetas similares a Júpiter (Udry y Santos, 2007) y por lo tanto no son considerados como posibles planetas habitables. La razón por la que no se han detectado planetas más pequeños es puramente tecnológica, pues las simulaciones de formación de sistemas planetarios nos indican que puede haber planetas terrestres en la zona de habitabilidad de sus estrellas. El mayor problema para detectar planetas tipo terrestre es el brillo de la estrella, que es 10^{10}–10^{11} veces en el visible y 10^{6}–10^{7} veces en el infrarrojo medio mayor que la luz reflejada por el planeta. A esto se le agrega la separación angular de los sistemas estrella-planeta, que es de 0,1 segundos de arco para un número limitado de estrellas en la vecindad solar (un radio de ~20 pc alrededor del Sol). La combinación de estas dos condiciones hace que la detección de planetas con masas alrededor de las 10 $M_{\oplus}$ esté limitada a estrellas de baja masa (tipo espectral M, ~0,5 $M_{\odot}$). La detección de exoplanetas terrestres requiere instrumentos en el espacio. Actualmente hay dos misiones en órbita para llevar a cabo este fin: CoRoT y Kepler. Ambas utilizan el llamado método de tránsito que consiste en detectar cambios en la luminosidad de la estrella debidos al paso de un planeta frente a ella.

CoRoT es un telescopio de 27 cm que fue lanzado en diciembre del 2006. Sus objetivos son el estudio de oscilaciones estelares (sismología estelar) y la detección de planetas extrasolares alrededor de estrellas de tipos espectrales K y M (Bordé *et al*., 2003). La misión es administrada por el Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia y en ella participaron varios países de Europa y Brasil.

Kepler es una misión de la NASA que consiste en un telescopio espacial de 95 cm que fue lanzado el 6 de marzo de 2009 (Basri et al., 2005). Kepler gira alrededor del Sol observando siempre la misma región de la galaxia buscando planetas en unas 100,000 estrellas. Este instrumento tendrá la capacidad de detectar planetas del tamaño de la Tierra y más grandes usando el método de tránsito.

Misiones subsecuentes serán necesarias para determinar si los planetas encontrados por CoRoT y Kepler pueden ser habitables. Actualmente se encuentran bajo estudio dos misiones, Darwin —de la Agencia Espacial Europea

(darwin.esa.int)— y Terrestrial Planet Finder (TPF) —de la NASA (planetquest.jpl.nasa.gov/TPF)—, cuya finalidad es caracterizar exoplanetas tipo terrestre. Darwin consistirá en un interferómetro en el infrarrojo (6-20 µm) que usará la técnica de interferometría de anulación para “ocultar” la luz de la estrella y observar planetas a su alrededor. Será capaz de obtener el espectro del planeta observado con una resolución $\lambda/\Delta\lambda \geq 25$ y una relación señal/ruido de 10 (Cockell et al. 2009). La misión TPF consiste en dos instrumentos, uno será similar a Darwin, llamado TPF-I (Lawson y Dooley, 2005). El otro instrumento, TPF-C, será un coronógrafo que obtendrá espectros de los planetas observados la región visible y del cercano infrarrojo (0,5-1,1 µm). La resolución planeada para TPF-C es de $\lambda/\Delta\lambda = 70$ con una relación señal/ruido de entre 5 y 10 (Levin et al. 2006).

6. Comentarios finales

El estudio de los planetas rocosos y algunos satélites de nuestro Sistema Solar nos muestra cómo funcionan los planetas y cuáles son los compuestos químicos que son producidos por procesos geológicos y atmosféricos. La comparación de los mundos no habitados con la Tierra es el primer paso para comprender el tipo de señales que podríamos esperar de un exoplaneta habitable.

Las conclusiones más relevantes a las que hemos llegado a partir de las bioseñales producidas por nuestro planeta son:

1. Los organismos unicelulares son capaces de generar bioseñales distribuidas globalmente y por lo tanto potencialmente detectables con instrumentos en órbita alrededor de nuestro planeta.
2. El oxígeno en el espectro visible y el ozono en el infrarrojo medio, resultan excelentes bioseñales. Para un planeta en la zona de habitabilidad de su estrella, con agua y una atmósfera de CO_2-N_2, la producción de oxígeno y ozono por procesos abióticos es mínima y no genera una señal en el espectro del planeta.
3. Los pigmentos de los organismos fotosintéticos podrían originar una bioseñal si cubren al menos el 20% de la superficie observada. La zona del espectro electromagnético en la que pueden absorber los pigmentos fotosintéticos depende de la cantidad de fotones proveniente de la estrella alrededor de la cual gira el planeta.

4. A partir de las variaciones temporales de la luz reflejada por el planeta se puede determinar la presencia de una atmósfera densa y el periodo de rotación del planeta.
5. Las nubes son el mayor reto a enfrentar en el análisis de espectros de planetas pues limitan la columna atmosférica observable.
6. La radiación ultravioleta recibida por el planeta domina buena parte de la química atmosférica.
7. En el infrarrojo medio las señales generadas por los compuestos de la atmósfera planetaria dependen no sólo de su abundancia si no también del perfil de temperatura de la atmósfera.
8. La detección simultánea de dos bioseñales, por ejemplo O_2/O_3 y CH_4 o N_2O, sería una evidencia convincente de la presencia de vida en un planeta.

Agradecimientos

El presente trabajo fue realizado gracias al apoyo de los proyectos PAPIIT No. IN119709 y Conacyt No. 79744.

Referencias

Bordé, P., Rouan, D. y Léger, A. Exoplanet detection capability of the COROT space mission, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 405: 1137-1144, 2003.

Carleton, N. P. y Traub, W. A. Detection of Molecular Oxygen on Mars, *Science*, vol. 177 (4053): 988-992, 1972.

Catling, D. C. y Claire, M. How Earth's atmosphere evolved to an oxic state, a status report, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 237: 1–20, 2005.

Cockell, C. S., Léger, A., Fridlund, M., Herbst, T. M., Kaltenegger, L., Absil, O., Beichman, C., Benz, W., Blanc, M., Brack, A., Chelli, A., Colangeli, L., Cottin, H., Coudé du Foresto, F., Danchi, W. C., Defrère, D., den Herder, J.-W., Eiroa, C., Greaves, J., Henning, T., Johnston, K. J., Jones, H., Labadie, L., Lammer, H., Launhardt, R., Lawson, P., Lay, O. P., LeDuigou, J.-M., Liseau, R., Malbet, F., Martin, S. R., Mawet, D., Mourard, D., Moutou, C., Mugnier, L. M., Ollivier, M., Paresce, F., Quirrenbach, A., Rabbia, Y. D., Raven, J. A., Rottgering, H. J. A., Rouan, D., Santos, N. C., Selsis, F., Serabyn, E., Shibai, H., Tamura, M., Thiébaut, E., Westall, F., White, G. J. Darwin-A Mission to Detect and Search for Life on Extrasolar Planets, *Astrobiology*, vol. 9 (1): 1-22, 2009.

Des Marais, D.J., Harwit, M.O., Jucks, K.W., Kasting, J.F., Lin, D.N.C., Lunine, J.I., Schneider, J., Seager, S., Traub, W.A. y Woolf, N.J. Remote sensing of planetary

properties and biosignatures on extrasolar terrestrial planets, *Astrobiology*, vol. 2: 153–181, 2002.

Ford, E., Seager, S. y Turner, E. L. Characterization of extrasolar terrestrial planets from diurnal photometric variability, *Nature*, vol. 412: 885-887, 2001.

Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Bruce, J., Lee, H.,Callander, B.A., Haites, E., Harris, N. y Maskel, K. *Climate Change, Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, Cambridge, Cambridge University Press, 1994.

Kasting, J.F. y Catling, D. Evolution of a habitable planet, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics,* vol. 41: 429–463, 2003.

Kiang, N. Y., Siefert, J., Govindjee y Blankenship, R. Spectral Signatures of Photosynthesis. I. Review of Earth Organisms, *Astrobiology*, vol. 7 (1): 222-251, 2007.

Kiang, N. Y., Segura, A., Tinetti, G., Govindjee y Blankenship, R., Cohen, M., Siefert, J., Crisp, D. y Meadows, V. S. Spectral Signatures of Photosynthesis. II. Coevolution with Other Stars and the Atmosphere on Extrasolar Worlds, *Astrobiology*, vol. 7 (1): 252-274, 2007.

Lawson, P. R. y Dooley, J. A. 2005. *Technology Plan for the Terrestrial Planet Finder Interferometer*, Pasadena, California, NASA /JPL. (JPL Document D-34923).

Levin, M., Shaklan, S. y Kasting, J. *Terrestrial Planet Finder Coronagraph. Science and Technology Definition Team (STDT) Report,* Pasadena, California, NASA /JPL. (JPL Publication 05-5), 2006.

Mayor, M. y Queloz, D. A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star, *Nature*, vol. 378: 355-359, 1995.

Meadows, V.S. y Crisp, D. Ground-based near infrared observations of the Venus nightside, the thermal structure and water abundance near the surface, *Journal of Geophysical Research*, vol. 101: 4595–4622, 1996.

Montañés-Rodríguez, P., Pallé, E. y Goode, P. R. Vegetation Signature in the Observed Globally Integrated Spectrum of Earth Considering Simultaneous Cloud Data: Applications for Extrasolar Planets, *The Astrophysical Journal*, vol. 651: 544-552, 2006.

Pallé, E., Ford, Eric B., Seager, S., Montañés-Rodríguez, P. y Vazquez, M. Identifying the Rotation Rate and the Presence of Dynamic Weather on Extrasolar Earth-like Planets from Photometric Observations, *The Astrophysical Journal*, vol. 676 (2): 1319-1329, 2008.

Sagan, C., Thompson, W. R., Carlson, R., Gurnett, D. y Hord, C. A Search for Life on Earth from the Galileo Spacecraft, *Nature*, vol. 365: 715-721, 1993.

Seager, S., Turner, E. L., Schafer, J. y Ford, E. B. Vegetation's Red Edge: A Possible Spectroscopic Biosignature of Extraterrestrial Plants, *Astrobiology*, vol. 5 (3): 372-390, 2005.

Segura, A., Kasting, J. F., Meadows, V. S., Cohen, M., Scalo, J., Crisp, D. Butler, R. A. H. y Tinetti, G. Biosignatures from Earth-Like Planets Around M Dwarfs, *Astrobiology*, vol. 5 (6): 706-725, 2005.

Segura, A., Krelove, K., Kasting, J. F., Sommerlatt, D., Meadows, V., Crisp, D., Cohen, M. y Mlawer, E. Ozone Concentrations and Ultraviolet Fluxes on Earth-like Planets around Other Stars, *Astrobiology*, vol. 3 (4): 689-708, 2003.

Segura, A., Meadows, V. S., Kasting, J. F., Crisp, D. y Cohen, M. Abiotic formation of O_2 and O_3 in high-CO_2 terrestrial atmospheres, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 472: 665-679, 2007.

Tinetti, G., Meadows, V. S., Crisp, D., Kiang, N. Y., Kahn, B. H., Bosc, E., Fishbein, E., Velusamy, T. y Turnbull, M. Detectability of Planetary Characteristics in Disk-Averaged Spectra II: Synthetic Spectra and Light Curves of Earth, *Astrobiology*, vol. 6 (6): 881-900, 2006.

Tinetti, G., Meadows, V. S., Crisp, D., Fong, W., Fishbein, E., Turnbull, M. y Bibring, J-P. Detectability of Planetary Characteristics in Disk-Averaged Spectra I, The Earth Model, *Astrobiology*, vol. 6 (1): 34-47, 2006.

Udry, S. y Santos, N. C. Statistical Properties of Exoplanets, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 45 (1) 397-439, 2007.

Capítulo 10

El camino desde la química prebiótica hacia los ciclos metabólicos

Marcelo I. Guzmán

Resumen Se presentan los principios necesarios para entender el origen de la vida y se discute y contrasta la definición de vida de la NASA. Se revisa el problema de la co-evolución geoquímica y bioquímica en nuestro planeta como paso previo a la presentación de tres tipos de modelos experimentales para explicar el origen de la vida. Ellos son: 1) el mundo del ARN, 2) el modelo de la compartimentalización y creación de protocélulas y 3) el metabolismo prebiótico en ausencia de enzimas. Se tratará el posible origen abiótico de las rutas metabólicas universales, posibilitadas por catalizadores como sulfuros de hierro y minerales semiconductores (por ej. sulfuro de zinc). Se aborda el modelo de las fuentes hidrotermales de baja profundidad como el ambiente que podría haber sostenido estas reacciones, y por medio de las cuales las primeras formas de vida que poblaron la Tierra fijaron dióxido de carbono.

Abstract The basic concepts necessary to understand the origin of life are presented together with a discussion about the difficulties that the operational definition of life from NASA implies. After introducing the emergence of biology from geochemistry on Earth, three experimental models to explain the origin of life are discussed: 1) the ARN world, 2) the compartmentalization in protocells approach, and 3) the non-enzymatic prebiotic metabolism model. Catalysis in mineral surfaces is suggested as the main mechanism for the possible origin of the central metabolic pathways in universal metabolism. Candidate catalysts are sulphide minerals (i.e., iron sulphide) and semiconductor minerals (i.e., zinc sulphide). A shallow-water hydrothermal vent system is presented as a model environment where the first microorganisms on Earth used these non-enzymatic chemical reactions as a pioneer mechanism for carbon dioxide fixation.

Marcelo I. Guzmán (✉)

Department of Chemistry, University of Kentucky, Chemistry-Physics Building # 150, 505 Rose Street

Lexington, KY 40506-0055

marcelo.guzman@uky.edu

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 223 - 247, © 2010 UNESCO-Montevideo.

1. Introducción

En este capítulo se presenta una reseña que resume los principios necesarios para el origen de la vida, para refrescar al lector los elementos necesarios para entender la dificultad del problema que se aborda. Se revisan algunos de los experimentos y teorías para el origen de las moléculas de la vida. Como paso previo a la presentación de algunos de los modelos conocidos sobre el origen de la vida, se discute y contrasta la definición de vida de la NASA. Trataremos de ir desentrañando cómo se formaron y originaron las protocélulas. Al final se hace especial mención al modelo del origen de la vida a partir del metabolismo en ausencia de enzimas.

Como punto de partida es necesario asumir la dificultad del problema que examinamos, y la implicancia del hecho de que nadie conoce con certeza cómo y dónde se originó la vida. En segundo término, resulta difícil definir a los sistemas vivos, aunque por lo general, se acepta que la vida que conocemos en la Tierra es el resultado de la evolución por selección natural (o Darwiniana). Los sistemas vivos que aparecieron más tarde se originaron de otros presentes con anterioridad en el proceso evolutivo. Así, los procariotas y los eucariotas se originaron independientemente en el árbol evolutivo. Además, se asume generalmente que las formas de vida, conocidas o extintas, descienden de por lo menos una célula que se originó a partir de materia inanimada, gracias a una evolución química, y previa a la biológica, en la Tierra u otra parte del universo. Las primeras células estuvieron precedidas por algún tipo de estructura similar a la que encontramos en las células en la actualidad, que no eran células en sí, pero que se asemejaban mucho a ellas. Estas estructuras se llaman en general protocélulas.

Por el desconocimiento acerca de cómo eran estas hipotéticas protocélulas y sus estructuras, se asume que estaban hechas de las cuatro biomoléculas que se encuentran en una célula en la actualidad: los polinucleótidos de ADNy ARN, las proteínas, los lípidos y los polisacáridos.

Una célula muestra cuatro niveles de complejidad en su organización. Por ejemplo, el núcleo celular es una organela que contiene varios tipos de complejos supramoleculares, incluyendo a los cromosomas. A su vez, los cromosomas están hechos de moléculas de ADNy muchos tipos de proteínas. Cada tipo de macromoléculas está formado por subunidades más simples, como ser las proteínas y el ADNque están hechos de aminoácidos y desoxirribonucleótidos respectivamente.

La Tabla 1 presenta los constituyentes mayoritarios de una célula de *E. coli*: las macromoléculas, que son polímeros de alto peso molecular que se ensamblan a partir de precursores relativamente simples. Los monómeros que forman las proteínas, los ácidos nucleicos y los polisacáridos tienen peso molecular de hasta 500 Daltons (Da). El número de unidades monoméricas puede ir desde unas pocas decenas hasta los millones. Las síntesis de las macromoléculas consumen mucha energía. A su vez las macromoléculas se pueden ensamblar en estructuras supramoleculares, formando unidades como por ejemplo los ribosomas.

Las proteínas son polímeros de aminoácidos, que forman la mayor fracción de las células —después del agua. Algunas proteínas tienen propiedades catalíticas y funcionan como enzimas. Otras actúan como elementos estructurales, receptores de señales (neurotransmisoras), y como transportadoras de ciertas sustancias hacia adentro o afuera de la célula.

Los ácidos nucleicos (ADNy ARN) son polímeros de nucleótidos que almacenan y transmiten la información genética. Además, algunos ARN son los catalizadores en complejos supramoleculares.

Los polisacáridos están formados por azúcares como la glucosa, y cumplen con dos funciones: almacenar energía para el uso posterior en la célula y actuar como elementos de reconocimiento de ciertas proteínas en la parte exterior de la célula.

Tabla 1 - Componentes moleculares de la célula de E. coli

	Porcentaje en peso total de la célula	**Número aproximado de diferentes especies moleculares**
Agua	70	1
Proteínas	15	3000
Ácidos nucleicos		
ADN	1	1
ARN	6	>3000
Polisacáridos	3	5
Lípidos	2	20
Subunidades monoméricas e intermediarios	2	500
Iones inorgánicos	1	20

Los lípidos o ácidos grasos son componentes estructurales de las membranas, ricas reservas de energía, forman parte de ciertos pigmentos y actúan de transmisores intracelulares.

2. Los requerimientos para la vida

Después de haber revisado las moléculas que encontramos en las formas de vida conocida, y que forman las biomoléculas, el siguiente punto consiste en presentar cuáles son los cuatro requerimientos básicos para la vida. La vida necesita de un hábitat adecuado para desarrollarse dentro de un cierto rango de condiciones fisicoquímicas (pH, temperatura, fuerza iónica, etc.), y se piensa, de manera casi uniforme, en un ambiente acuoso para su origen. Es en éste hábitat, que un compartimiento, la membrana celular, contiene la estructura material interna —el citoplasma—, donde ocurren los procesos genéticos (replicación, reproducción y síntesis de proteínas) y metabólicos (generación y consumo de energía y sustancias materiales). Para hacer más general este esquema, se le puede agregar las interacciones entre las células, de un mismo sistema, o de diferentes sistemas.

Se puede decir que la vida consiste de células hechas de átomos de carbono orgánico, que se encuentran en disoluciones acuosas, y se componen de macromoléculas, siendo capaz de generar energía; posee la capacidad de crecer y reproducirse; y responde y se adapta a través de generaciones sucesivas a las condiciones del medioambiente.

El siguiente punto es más complicado porque trata acerca de cómo definir lo que es la vida. El problema es en realidad mucho más amplio pero vale la pena abordarlo. Una de las definiciones más usadas es la definición de trabajo de la NASA (la Agencia Espacial y de Aeronáutica de los E.E.U.U. por sus siglas en inglés) que propone que: *"La vida es un sistema químico que se puede sostener por sí mismo y es capaz de experimentar evolución Darwiniana (evolucionar por los mecanismos de selección natural)"*.

La definición de la NASA, como la mayoría de las definiciones, presenta algunos problemas. La idea de evolución Darwiniana sólo se aplica a una población, excluyendo por lo tanto a los especímenes individuales, compuestos químicos y formas de vida artificial, en caso que el ser humano llegue a crear vida. Si imaginamos por ejemplo que una sonda espacial encontrara plantas de

un solo tipo, no se podría concluir que están vivas, porque no hay una población Darwiniana y podrían extinguirse por completo. Sin embargo, el uso de esta definición es extenso dentro del campo del estudio del origen de la vida (Horowitz y Miller, 1962, Joyce, 1994). En realidad el término "capaz" hace alusión a la presencia de material genético (ADNo ARN) que se comporta de un modo conocido.

Una definición de vida que usa observaciones macroscópicas y sentido común es válida no solo para la descripción de un simple espécimen sino también para un caso general que tiene validez universal (Luisi, 2006). La Figura 1 corresponde a un esquema del comportamiento de una célula con un límite externo y un mecanismo interno de organización.

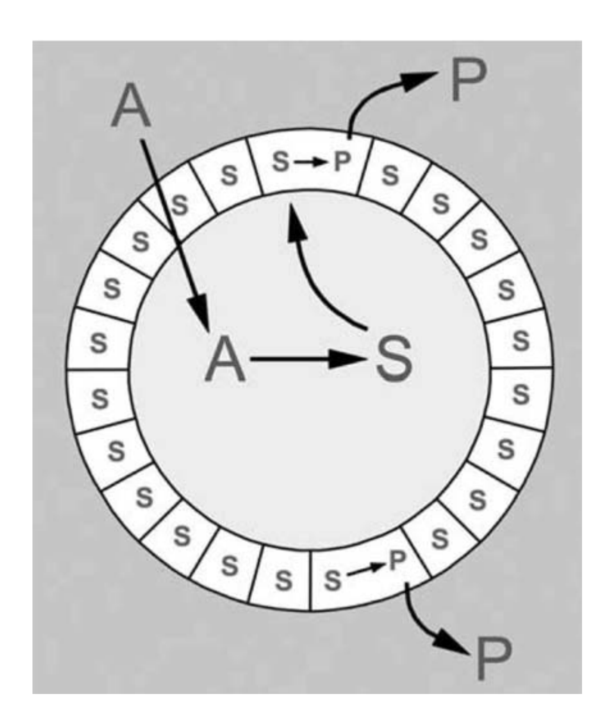


Fig. 1 - Esquema de la vida de Luisi, P. L., en "The Emergence of Life: From Chemical Origins to Synthetic Biology", Cambridge University Press, Camdridge, 2006.

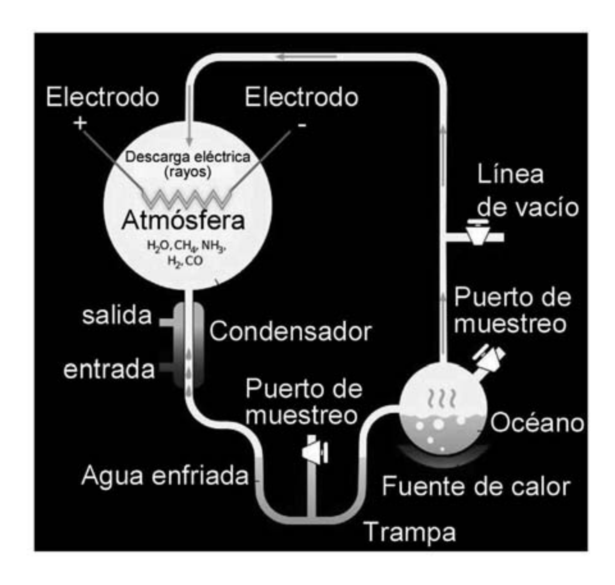


Fig. 2 - El experimento de Miller.

S representa una parte del sistema vivo, que se convierte en un producto P; sin embargo, el sistema es capaz de regenerar S al transformar el alimento entrante A en S de nuevo. Esta definición de vida puede resumirse diciendo que un sistema está vivo si es capaz de transformar material/energía externa en un proceso interno de auto mantenimiento y producción de sus propios componentes.

Con los fundamentos de saber cómo está compuesta la vida, y la comprensión acerca de lo que son los seres vivos, la siguiente sección trata acerca de las teorías y los experimentos de química prebiótica que habrían permitido la transición desde la materia inanimada a la vida.

3. Co-evolución geoquímica y biológica

El primer problema con el que un científico se enfrenta al estudiar el origen de la vida es el de la evolución o surgimiento de la bioquímica a partir de la geoquímica, que representa la única química posible anterior a la aparición de vida. Revisemos nuevamente el famoso experimento de Miller (1953) que

probó la hipótesis de la evolución química (Figura 2). Él decidió empezar con moléculas sencillas (H_2O, NH_3, H_2 y CH_4) contenidas en una ampolla de vidrio, que representaba a la atmósfera prebiótica, y que estaba conectada a dos electrodos y en línea cerrada a un balón lleno hasta la mitad con agua, que representaba el océano. La evaporación del agua del océano prebiótico, en la simulación, se inició por calentamiento, mientras que la energía externa fue provista por descargas eléctricas a través de los electrodos, que simularon ser rayos. Luego la "atmósfera" del experimento se enfrió por medio de un condensador y se la condujo nuevamente al balón con agua en un ciclo continuo.

Los productos de reacción en la fase gaseosa consistían de una mezcla de CO y CO_2, además de los reactivos iniciales. Al parecer las ideas postuladas por Alexander Oparin con anterioridad daban resultados experimentales por primera vez, porque en la fase acuosa se identificaron algunos aminoácidos, hidroxiácidos, aldehídos, y cianuro de hidrógeno (HCN). En experimentos posteriores, en los que se usó HCN como uno de los ingredientes iniciales, se produjeron también algunas de las bases de los ácidos nucleicos (Oró y Kimball, 1961, 1962). Se observaron incluso ácidos grasos. En otro tipo de experimentos de observó la producción auto catalítica de algunos azúcares a partir de formaldehído (H_2CO) a 100 ºC, en presencia de hidróxido o carbonato de calcio, o arcillas como la caolinita.

En el experimento original de Miller (1953), después de una semana de reacción, un 15% del carbono original (CH_4) se encontraba fijado como carbono orgánico, y un 2% correspondía a una mezcla racémica de aminoácidos, siendo la glicina el más abundante. La crítica posterior se centró en las condiciones del experimento, porque se piensa que la atmósfera no era reductora, pero que tenía un carácter neutro. Sin embargo, experimentos posteriores bajo condiciones neutras (Cleaves et al., 2008) revelaron la producción de las mismas moléculas. Actualmente se considera en base a los resultados de estos experimentos y comparaciones con otras fuentes alternativas de moléculas orgánicas, que el principal mecanismo de fijación de carbono ocurrió en la Tierra. Otras modificaciones más recientes permitieron la producción de pirimidinas cuando la síntesis se lleva a cabo en hielo (Menor-Salvan et al., 2009).

La principal dificultad que surge a partir del aprendizaje logrado gracias a los experimentos de Miller, es que si bien se generan monómeros, no se provee un mecanismo de polimerización. Por ej., el siguiente paso evolutivo a la síntesis de los aminoácidos estaría dado por su polimerización para producir proteínas. Otro criticismo, quizás más importante, es que no generan el siguiente nivel de complejidad evolutiva, que es el de la organización química.

4. Principales modelos del origen de la vida

La bibliografía acerca del origen de la vida cuenta con variados modelos y escenarios teórico-experimentales. Cada uno representa una perspectiva sobre el origen de la vida, y como consecuencias, de los experimentos a realizar en simulaciones en el laboratorio. De un modo arbitrario, aquí se mencionarán solamente tres de ellos: 1) el mundo del ARN, 2) la estrategia de los compartimientos y 3) la propuesta del metabolismo en ausencia de enzimas. Las tres posibilidades han reunido trabajo teórico y datos experimentales. Se abordarán los dos primeros modelos de manera breve y luego se profundiza la química correspondiente al tercero. La implicancia es que otros tantos modelos teóricos del origen de la vida no serán considerados. Sería imposible tratar los más de treinta modelos existentes en este capítulo. Por otra parte, es imposible verificar experimentalmente la mayoría de esos modelos por ser matemáticos o computacionales.

4.1. El mundo del ARN

El mundo del *ARN* (Gilbert, 1986, Orgel, 2004) surgió a partir de experimentos similares, pero más complejos, a los de Miller, que produjeron componentes celulares como polipéptidos y moléculas similares al ARN. Los polímeros de ARN pueden actuar como catalizadores de reacciones importantes, y las moléculas de ARN probablemente jugaron un papel clave en la evolución prebiótica, tanto como catalizadores y como depositarios de la información.

El modelo se basa en que el ARN, o un precursor del mismo, podría haber contenido la primera información genética mientras simultáneamente cumplía funciones como un catalizador. El ARN tiene la característica de catalizar su propia formación. En este modelo, una de las etapas tempranas de evolución bioquímica fue la formación azarosa de una primera molécula de ARN (o su precursora) en la sopa prebiótica, que pudo catalizar la producción de otras moléculas de ARN del mismo fragmento, de modo que se auto-replicó y perpetuó. Su concentración habría aumentando exponencialmente, pero durante el proceso de copiado, los errores cometidos generaron variantes de la molécula original, resultando en algunas moléculas con mayor eficiencia para la auto-replicación. Por ese motivo, las más eficientes habrían acaparado los nu-

cleótidos disponibles, mientras que las menos eficientes se habrían extinguido de la población.

Con posterioridad se produjo la división entre las funciones de almacenamiento de la información en el ADNy catalíticas en las proteínas. Otro proceso evolutivo habría resultado en la aparición de variaciones del ARN auto-replicante con la habilidad adicional de actuar como catalizador en la condensación de los aminoácidos en péptidos. Un nuevo mecanismo de retroalimentación y refinamiento de los procesos previos habría surgido en oportunidades en las que los nuevos péptidos interactuaron con el ARN, reforzando su poder auto-catalítico. La hipótesis del mundo del ARN encuentra sustento en la existencia de los ribosomas, la maquinaria que usa la célula en la síntesis de proteínas, donde el ARN (y no las proteínas) cataliza la formación los enlaces peptídicos.

El siguiente paso en la evolución del sistema habría ocurrido cuando las moléculas de ADNcon secuencias complementarias a las del ARN comenzaron a controlar la información genética, mientras que el ARN evolucionó desempeñando un papel en la síntesis de proteínas. Las proteínas resultaron ser catalizadores más versátiles y con el correr del tiempo se apoderaron de esta función.

El último paso habría involucrado la formación de una membrana alrededor de todas las moléculas. Las moléculas de la membrana, similares a los lípidos, se formaron en la sopa prebiótica. Fue en ese ambiente de más elevada concentración de proteínas y ácidos nucleicos que se favorecieron las interacciones moleculares necesarias para el proceso de replicación.

4.2. El modelo de la compartimentalización

El modelo de los compartimientos o vesículas se inicia, de una manera similar a la que finaliza el modelo previo, con la existencia de una barrera física esférica, del tipo de las membranas celulares, como la que presentan todas las formas de vida (Morowitz et al., 1988). El material genético debe estar contenido[2] conjuntamente con subcompartimientos, que interactúan entre sí y con el exterior, garantizando el flujo de materiales e información a través de la barrera del compartimiento. El compartimiento primitivo original tiene que haber contado con una barrera semipermeable y cerrada (Deamer, 1986).

2 El ARN y el ADN en estado libre no representan vida

El principal sustento de esta hipótesis es la formación espontánea de vesículas, similares a los compartimientos celulares, a partir de moléculas de origen prebiótico.

El enfoque de algunos laboratorios que trabajan en este tema es la producción de vida artificial *de novo*. (Szostak et al., 2001, Luisi et al., 2006). Otros grupos siguen el camino contrario y tratan de cancelar las funciones de una célula individual para aprender cuáles son los requerimientos mínimos para la vida (Forster y Church, 2006, Feher et al., 2007). Cualquiera sea el método, el objetivo final es construir una protocélula. Las protocélulas que se han construido hasta ahora están hechas básicamente de ácidos grasos sencillos que funcionan como una barrera física donde en el futuro se espera que la replicación del ARN pueda ocurrir. La idea contempla incluir a todas las biomoléculas en una vesícula lipídica.

Las moléculas claves para crear una protocélula son los ácidos grasos saturados e insaturados, como por ej. los ácidos esteárico y oleico, respectivamente, ambos de 18 carbonos. Ellos poseen una cola hidrocarbonada hidrófoba, y una cabeza polar hidrofílica.

¿Qué ventajas representa el uso de un compartimiento para la vida? 1) Es el ambiente adecuado donde se pueden preconcentrar las moléculas y los nutrientes esenciales para la vida, con el consiguiente aumento en la velocidad de las reacciones químicas de segundo orden a comparación de un océano diluido.[3] 2) Permite proteger a moléculas sensibles,[4] como muchos metabolitos y macromoléculas de las condiciones externas extremas. 3) Actúa en el control para importar nutrientes y exportar los desechos. Del mismo modo, gracias a la permeabilidad de la membrana celular, se pueden establecer gradientes químicos que se usan para generar energía. 4) Por último, pero de mayor importancia, el compartimiento es el lugar apropiado donde la replicación del ARN puede ocurrir de manera selectiva, disminuyendo el riesgo de que ocurra al azar.

Los experimentos en este campo por lo general empiezan con la producción de vesículas lipídicas. Es bien conocido el fenómeno de agregación por el cual las moléculas de ácido oleico forman micelas invertidas, y por arriba de una cierta concentración se forma una bicapa cerrada alrededor de la micela, que se llama vesícula (Figura 3). Una de las ventajas que presenta la bicapa

3 En el citoplasma celular muchos metabolitos llegan a concentraciones micro- y milimolar.

4 Sirven como catalizadores, elementos estructurales o desempeñan funciones a nivel genético.

de la vesícula por sobre la monocapa de la micela es su mayor flexibilidad. La observación experimental más avanzada en este campo es que las vesículas creadas pueden sobrevivir por varias semanas y se dividen por medio de una acción física del medioambiente, tal como la entrada de energía mecánica al sistema, con la transferencia de material genético cargado en las vesículas originales a las nuevas generaciones.

El modelo de la compartimentalización sostiene que en estas vesículas primitivas se encapsularon los primeros catalizadores para la síntesis de péptidos conjuntamente con otras moléculas, donde el primer sistema metabólico se originó y por procesos de evolución apareció el ARN. Las pruebas experimentales sólo pueden sustentar la generación espontánea de vesículas para las protocélulas. En el otro extremo se encuentra el mundo del ARN, en el que las moléculas de ARN ya están formadas, pero no puede explicar el modelo de las protocélulas. La brecha que existe entre ambos modelos será resuelta cuando se descubra como se forma ARN a partir de una secuencia prebiótica, o desde una serie de reacciones interrelacionadas en un ciclo químico, o por medio de alguna otra alternativa.

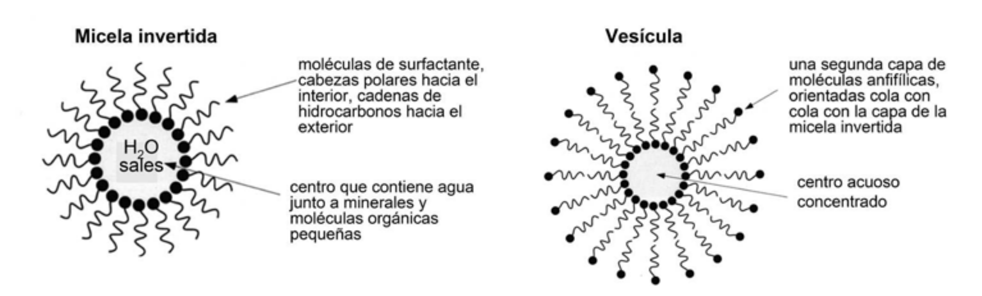


Fig. 3 - Orientación de los ácidos grasos en una micela invertida y en una vesícula.

4.3. Los modelos del metabolismo prebiótico

El tercer tipo de modelo que se describe a continuación es el del metabolismo en ausencia de enzimas. El término metabolismo se puede definir como la totalidad de las reacciones químicas y cambios físicos que ocurren en los seres vivos, incluyendo anabolismo[5] y catabolismo[6] (Cammack, 2006).

5 El anabolismo es la parte del metabolismo que requiere energía, en el que sustancias simples son convertidas en otras más complejas.

6 El catabolismo es cualquier proceso metabólico que involucra la degradación de sustancias complejas en productos más pequeños, incluyendo la degradación por ruptura de complejos orgánicos para liberar energía para el uso por parte de la célula u organismo.

Son pocos los grupos de investigación que investigan los pasos metabólicos prebióticos que derivaron en la existencia de enzimas. Existe la posibilidad de que sus resultados expliquen la desconexión entre los modelos del ARN y el de las vesículas. La originalidad de los científicos en este campo se manifiesta en los variados puntos de vista expuestos a continuación.

4.3.1. El metabolismo universal

Las ideas originales de Morowitz y sus colegas (Morowitz et al., 1991, Morowitz et al., 2000, Smith y Morowitz, 2004) componen probablemente la piedra fundacional del metabolismo prebiótico. Ellos examinaron la química de un sistema modelo, que representa a un quimiolitótrofo[7] primitivo, hecho de C, H y O, que se origina a partir de CO_2 y utiliza pares de energía de especies reductoras. Para predecir todas las posibles moléculas que se podrían originar a partir del sistema, sus caminos de reacción e interconexiones, usaron la extensa base de datos “Beilstein on-line”, que contiene 3,5 millones de moléculas orgánicas. Luego de un análisis exhaustivo y aplicando ciertas constricciones fisicoquímicas concluyeron que sólo surgirían abioticamente 153 moléculas orgánicas en los ciclos de reacción, y entre ellas está un subgrupo de 11 ácidos carboxílicos que participan en el ciclo inverso de los ácidos tricarboxílicos (CIATC) también llamado ciclo reductivo del ácido cítrico.

La Figura 4 muestra el CIATC, en el que participan 11 ácidos carboxílicos. Las reacciones van desde oxaloacetato (de cuatro carbonos o C4) hasta citrato (C6) en una serie de reacciones que involucran las cinco reducciones (numeradas de 1 a 5), carboxilaciones (incorporación de CO_2), deshidrataciones e hidrataciones (pérdida y ganancia de agua respectivamente), e isomerizaciones. Finalmente, el citrato se fragmenta regenerando oxaloacetato y una nueva molécula que incorpora dos unidades de CO_2 en acetato (C2). La vía de incorporación de CO_2 en acetato produce piruvato (C3), que por medio de una nueva carboxilación genera oxaloacetato en una reacción de tipo anaplerótica, que sirve para rellenar el ciclo con uno de sus compuestos. Las moléculas de alanina, glutamato y aspartato son ejemplos de los aminoácidos que se pueden obtener de estos ácidos por medio de reacciones metabólicas. Las especies en mayúscula representan la generalización del tipo de biomoléculas posibles de

7 Los quimiolitótrofos son organismos capaces de obtener la energía necesaria para su supervivencia a partir de la materia inorgánica.

ensamblar por medio de las vías anabólicas. La inclusión de malonato sirve para indicar un camino de síntesis de ácidos grasos. Es por ellos que el ciclo puede considerarse como una verdadera fábrica de síntesis para las mayores clases de biomoléculas. En la actualidad es más común encontrar el ciclo funcionando catabolicamente u oxidativamente en su dirección normal, que en la opuesta a la descrita, para generar ATP (energía) en una serie de reacciones de descarboxilación mediadas por enzimas.

Fig. 4 - El ciclo inverso de los ácidos tricarboxílicos (CIATC), eje central del metabolismo universal.

El metabolismo universal racionaliza que todos los posibles ciclos metabólicos son parcialmente comunes y convergen en el CIATC por medio de intermediarios compartidos, el que por lo tanto es una de las bases del origen de la vida. Las enzimas, que son las proteínas especializadas capaces de catalizar todas estas reacciones metabólicas, habrían aparecido posteriormente en los ciclos metabólicos, acelerándolos y tomando eventualmente el control completo de estas vías. La consecuencia de fondo es que el metabolismo surgió con anterioridad al origen de las macromoléculas con propiedades catalíticas o enzimas.

El modelo no es aceptado de manera absoluta y entre los críticos más severos se encontraba Orgel (2000), quien simpatizaba fervientemente con el mundo del ARN. Su principal observación radicaba en las propiedades catalíticas de los minerales, que habrían participado en la organización del sistema químico. De modo opuesto, un científico que sostiene las ideas del metabolismo universal y es un crítico acérrimo del mundo del ARN es Shapiro (1986, 2006). Sus ideas han sido influyentes en el mundo del metabolismo sin enzimas, y considera prácticamente imposible el orden necesario en el mundo del ARN para que éste pueda surgir de manera aleatoria en el medioambiente.

4.3.2. El metabolismo en arcillas y sobre la superficie de minerales

Uno de los problemas principales que el metabolismo sin enzimas acarrea, es el requerimiento de las elevadas energías de activación (E_a) de las reacciones químicas involucradas. Como las enzimas tienen la capacidad de catalizar las reacciones reduciendo E_a, ellas hacen posible muchas reacciones energéticamente desfavorables. Además, las reacciones ocurren con especificidad en los sitios activos de las enzimas, donde la conformación tridimensional es altamente específica, y la concentración "real" de los reactivos es considerablemente mayor que en el entorno.

En relación a una idea primero sugerida por Bernal, Cairns-Smith (Cairns-Smith et al., 1977, 1978, 1992) demostró que la superficie de minerales de arcilla, en un ambiente acuoso, pueden adsorber moléculas orgánicas, originando un incremento de concentración. Las superficies se comportan también como un molde para las polimerizaciones. La "sopa prebiótica" consiste aquí en moléculas orgánicas adsorbidas a la superficie de los minerales y no en una solución. La catálisis y la replicación del origen de la vida aparecieron tempranamente en la Tierra como consecuencia de la regularidad existente en la estructura cristalina de los minerales ampliamente distribuidos. La estructura cristalina de estos minerales es mucho más sencilla que la de cualquier molécula orgánica de relevancia. Los cristales minerales crecen y se reproducen al partirse en pequeños cristales que pueden crecer de manera adicional. Con la incorporación de impurezas, durante el crecimiento, experimentaron el primer tipo de evolución y mutación primitiva. El siguiente paso habría sido la incorporación de péptidos presentes en el medioambiente, con el consiguiente aumento de complejidad y desde allí una transición al dominio de la genética.

Sin embargo, hay una gran distancia con la química del mundo real para la construcción de proteínas, ácidos nucleicos y vesículas de compartimiento lipídico. Por supuesto que el modelo sostiene que la química en matrices primitivas de arcilla o superficies minerales, evolucionó eventualmente al mundo de las membranas y los lípidos. Al igual que la propuesta de Morowitz, que se presentó previamente, también postula un tipo de metabolismo sin enzimas y previo a su aparición.

4.3.3. El mundo del hierro y del azufre

El modelo de Wachtershauser (Wachtershauser, 1988, 1990a, b, Huber y Wachtershauser, 1997, Wachtershauser, 2007) se encuentra en cierto modo relacionado al de Morowitz. La base del modelo radica en el origen autotrófico de la vida por medio de un sistema químico sin enzimas como el CIATC. Los autótrofos son organismos que "fabrican su propio alimento" de una fuente inorgánica de carbón (dióxido de carbono) y una determinada fuente de energía. La síntesis y polimerización de compuestos orgánicos ocurren sobre la superficie de minerales de sulfuro de hierro en ambientes volcánicos extremadamente reductores, como una fuente o fumarola hidrotermal situada en lo más profundo del océano.

En este modelo, la reducción de CO_2 (y/o CO) produjo las moléculas orgánicas que evolucionaron en un ciclo autocatalítico[8], mediado por el sistema metabólico quimiolitotrófico y bidimensional de la superficie de los sulfuros de hierro. El sistema metabólico carece por lo tanto de un sistema genético.

De manera paralela e independiente se descubrió la riqueza en compuestos orgánicos presentes en fumarolas calientes de gran profundidad (Holm et al., 1992). La propuesta tomó entonces fuerza propia como "el mundo del hierro y del azufre" al encontrar un ambiente donde tanto CO_2 como N_2 podrían haber sido reducidos a moléculas orgánicas gracias a los sulfuros de hierro. La implicancia es que este modelo también representa una conexión entre los campos de catálisis de superficie y las fumarolas térmicas.

Uno de los cimientos del modelo es que el sistema puede tomar ventaja de la energía liberada por el medioambiente en la reacción de formación de la pirita (FeS_2). En un ambiente como el de una fumarola son comunes las reacciones entre los iones de los metales disponibles y los gases como el H_2S. Así,

8 La autocatálisis es el proceso mediante el cual un compuesto químico induce y controla una reacción química sobre sí mismo.

el catión Fe^{2+} reacciona con H_2S y precipita como FeS, produciéndose luego la reacción $FeS + H_2S \rightarrow FeS_2 + H_2$, que es favorable, ya que viene acompañada por una pérdida en el cambio de energía libre $\Delta G° = -38,4$ kJ mol $^{-1}$.

La Figura 5 muestra un ejemplo de los caminos de reacción posibles en este modelo. Cabe mencionar que el metabolismo se sustenta en las interacciones entre los constituyentes con cargas negativas y la superficie del mineral cargada positivamente. Wachtershauser postula que los experimentos de este modelo tienen el objetivo de lograr largas cascadas de reacción y retroalimentación catalítica (metabolismo) desde un principio.

Contrariamente a las propuestas de Wachtershauser y Morowitz, no hay demasiada evidencia experimental que las compruebe con éxito. Algunos de los experimentos que presentaron resultados prometedores son los de Cody et al., (2000), que simularon las condiciones de una fumarola de gran profundidad a elevadas temperaturas (250 °C) y presiones (100 atm). La novedad fue la generación de piruvato (0,07%) y acetato (0,05%) a partir de formato (HCOOH) en presencia de FeS y nonanotiol (CH_3-$(CH_2)_8$-SH). Lo más alentador reportado directamente por Huber y Wachtershauser (2006) fue la producción de α-aminoácidos y de α-hidroxiácidos como por ej. lactato en concentraciones de 0,1-1,0 μM, a partir de CO, KCN, CH_3SNa, Na_2S, Fe^{2+} y Ni^{2+}, a altas temperaturas (100 °C) y presiones (10 atm).

4.3.4. El modelo del metabolismo en minerales semiconductores

El modelo del metabolismo en minerales semiconductores sigue una línea de razonamientos basada en hechos reales acerca de las primeras formas de vida, y plantea un nuevo mecanismo simultáneo de transferencia de energía y fijación de materia orgánica en un medioambiente existente en el mundo prebiótico.

Las formas de vida más antiguas, que son aceptadas por la mayoría de la comunidad científica, fueron identificadas al oeste de Australia y tienen una antigüedad de por lo menos 3,465 millones años (Ga = 10^9 años) (Schopf, 1993). Estos presuntos autótrofos capaces de fijar CO_2 habrían estado ampliamente distribuidos y muy probablemente se formaron en un sistema marino de poca profundidad (Allwood et al., 2006), por lo que deberían haber estado expuestos a la luz del Sol. Se piensa que las condiciones ambientales relevantes a ese eón geológico, corresponden a mayores niveles de irradiación UV, dada

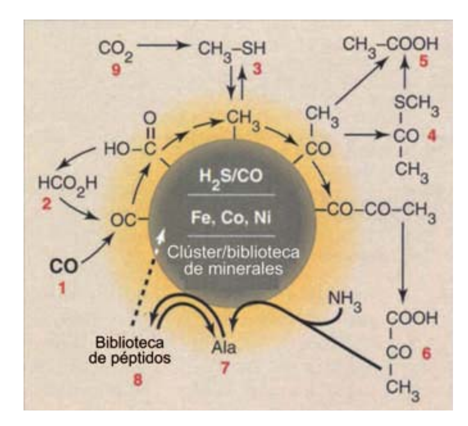


Fig. 5 - Las flechas sólidas representan las 8 reacciones para convertir (1) CO en (8) péptido. La flecha punteada representa el efecto que un ligando (como un péptido) o un ciclo (como el CIATC) tendría sobre el sistema bajo condiciones óptimas para que haya autocatálisis y evolución. Adaptado de Wachtershauser, (2000).

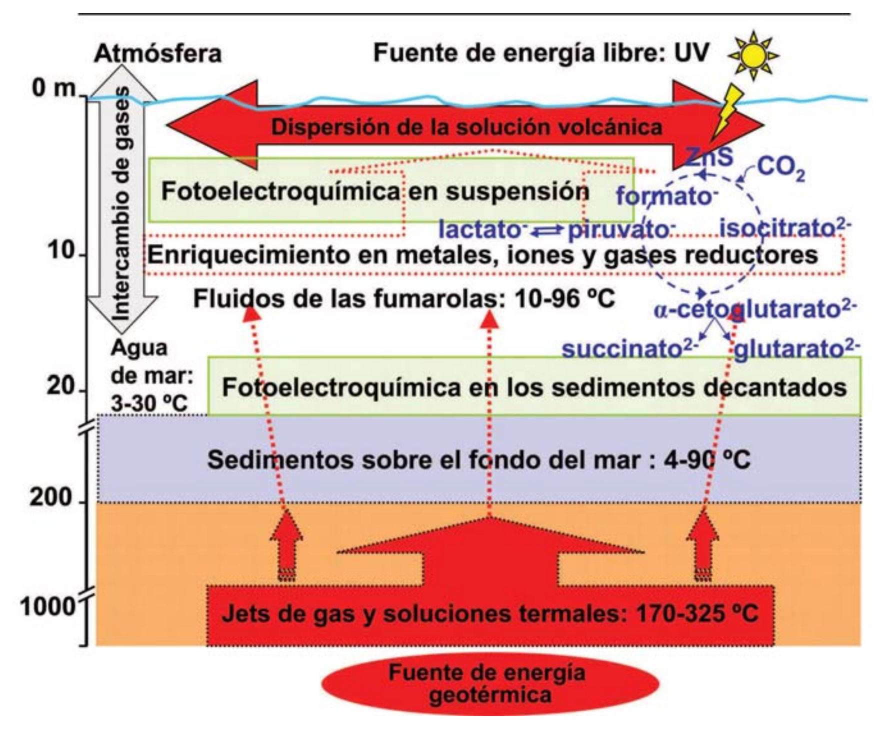


Fig. 6 - Fuente hidrotermal de poca profundidad para la aparición de la vida en el modelo del metabolismo en minerales semiconductores. Se ilustra el rol de la fotoquímica sobre minerales como ZnS para posibilitar las reacciones del CIATC. Adaptado de Guzmán y Martin, (2009).

la mayor luminosidad del joven Sol, y a una atmósfera anóxica, dominada por otros gases que incluyen a los óxidos de carbono.[9]

Una de los interrogantes claves acerca del origen de la vida consiste en conocer cuál fue el mecanismo inicial por el que estos microorganismos primitivos fijaban carbono (Guzmán y Martin, 2008). Más allá de las diferencias existentes entre los seis diferentes mecanismos que la vida utiliza para fijar carbono (Thauer, 2007, Huber et al., 2008), y de que se piense que el CIATC es el principal candidato por encontrarse en bacterias reductoras de azufre muy antiguas, todos los mecanismos comparten algunos intermediarios en común. Además, el modelo hace uso de la hipótesis del metabolismo universal, por lo que considera como posible una combinación de los mecanismos conocidos, o al menos la existencia de un ciclo de fijación de carbono simplificado y relevante a la aparición de la vida. La implicancia es que este mecanismo debería haber usado algunos de los compuestos clave en las vías anabólicas centrales.

Por otra parte, el sistema de este modelo también debe ser capaz de ejecutar los procesos metabólicos de manera abiótica y sin enzimas. Para ello recurre a la organización por medio de minerales semiconductores de sulfuro, que pueden tomar energía disponible del medioambiente, y que habría funcionado de un modo autosuficiente.

Con posterioridad al intenso período de caída de bólidos, desde 4.100 a 3.800 millones de años atrás, la actividad volcánica y geotérmica de la Tierra era elevada. Como consecuencia, las fuentes hidrotérmicas en los océanos eran más abundantes que en la actualidad. Entre estas se encuentran las fuentes hidrotérmicas de poca profundidad, situadas a menos de 200 metros de profundidad. La temperatura del agua en estos ambientes es mucho más templada (3-30 °C) que en las fumarolas de gran profundidad.[10] La Figura 6 presenta una ilustración de un posible ambiente para el modelo del metabolismo en minerales semiconductores. Se trata de una fuente hidrotérmica de baja profundidad situada en el océano, en cuyas adyacencias hay un enriquecimiento en iones metálicos (Zn^{2+}, Mn^{2+}, etc.) y gases reductores (H_2S, H_2, etc.) en relación a las aguas circundantes. A la salida de este tipo de fumarolas con gases como el sulfuro de hidrógeno, se forman precipitados coloidales de sulfuros minerales semiconductores como el ZnS, MnS, etc., lo cuales se mantienen dispersos en suspensión o eventualmente depositados sobre la plataforma

9 Modelos atmosféricos establecen un rango de entre 0,1 y 10 atm para la presión parcial de CO_2 (Kasting, 1993).

10 Las fumarolas de gran profundidad son las situadas por debajo de los 200 m de profundidad.

submarina. Bajo estas condiciones, los minerales semiconductores pueden ser activados por la radicación solar que penetra bajo el agua, y transferir energía al CO_2 disuelto, o a los compuestos orgánicos —fijados directamente por este mecanismo; provenientes de la fijación primaria probada en los experimentos de Miller, o de origen extraterrestre (de condritas carbonaceas). El nuevo modelo no sólo permite la absorción de las moléculas orgánicas a los minerales de sulfuro, sino que también presenta la ventaja basada en la transferencia de energía solar por medio de las propiedades semiconductoras de los minerales. Como varias de las reacciones del CIATC son reducciones (reacciones 1 a 5 de la Figura 4) (Zhang y Martin, 2006), y muchas son termodinámicamente desfavorables, el principio de transmisión de energía fotoquímica a través del semiconductor tiene la potencialidad de convertir reacciones inviables en posibles (Guzmán y Martin, 2008).

El principio fotoelectroquímico se basa en la absorción de un fotón de luz en el rango de longitud de onda de la banda de absorción del mineral. En este caso, si se trata de esfalerita, la banda prohibida del semiconductor tiene una diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción de $\Delta E°_{ZnS}$ = 3,6 eV, que corresponde a radiación UV de 344 nm. Con la absorción de un fotón por parte del semiconductor se promueve un electrón desde la banda de valencia, donde aparece un hueco, a la de banda de conducción. El electrón con poder de reducción en la banda de conducción puede reducir por ej. CO_2 a formato ($HCOO^-$) por vía del radical aniónico $CO_2^{\dot{-}}$. El sulfuro de hidrogeno (H_2S) que emana de la fumarola (u otra especie reductora) permite completar el circuito eléctrico al reaccionar con los huecos oxidantes, para producir especies oxidadas del azufre. El mecanismo involucra tanto oxidaciones como reducciones que ocurren simultáneamente en pequeñas partículas coloidales. Algunos de los materiales semiconductores de relevancia son mejores reductores (por ej., ZnS, MnS y CdS) mientras otros son especiales para producir oxidaciones (por ej., TiO_2).

Los experimentos realizados para explicar el origen del metabolismo simulan de manera bastante cercana el medioambiente arriba descrito. Para la realización de los mismos, se cuenta con un reactor fotoquímico, con una fuente de energía UV (200-400 nm) y una suspensión coloidal de esfalerita (ZnS), bajo agitación continua en ausencia de oxígeno. El ZnS sintetizado es representativo de los semiconductores presentes en el sistema hidrotermal. La temperatura, el pH y la composición de la atmósfera incluyendo la concentración de CO_2 se pueden controlar.

Como un ejemplo de los estudios sobre sulfuros semiconductores se puede mencionar el trabajo con catalizador de ZnS, en el que se comenzó con lactato ($CH_3CH(OH)COO^-$) y CO_2. Se generó una cadena de reacciones en presencia de H_2S. Por medio de análisis cromatográficos se observó la producción oxidativa de piruvato, con la posterior formarción de succinato, glutarato, α-cetoglutarato e isocitrato. Varias de las reacciones transcurren con eficiencias elevadas. En el esquema que se presenta en la Figura 7 los compuestos orgánicos que han sido observados en simulaciones en el laboratorio se indican precedidos por un asterisco (Zhang y Martin, 2006, Guzmán y Martin, 2009). La línea de reacción de piruvato a malato corresponde a una reacción de carboxilación que aunque no fue exitosa todavía, se sugirió como posible por debajo de los 25 °C y a pH 7 en un estudio cinético en función de la temperatura (Guzmán y Martin, 2008).

Fig. 7 - Moléculas del CIATC generadas en reacciones fotoquímicas sobre ZnS.

El catalizador de sulfuro de zinc sintetizado para estos estudios presentó cierta selectividad. Tal fue el caso en la reducción del grupo carbonilo del oxaloacetato para producir malato, que ocurre con una eficiencia del 80% y 24 veces más rápido que la posible pérdida de lactato a piruvato (eficiencia de 30%). Es destacable la presencia de α-cetoglutarato, un compuesto energéticamente costoso de producir. Más sencilla es la reducción de fumarato a succinato. Todavía restan algunos pasos de deshidratación, hidratación, isomerización y fragmentación para completar el ciclo.

En los últimos años se han producido grandes avances para completar la etapa inicial de identificación de los posibles caminos de generación de los metabolitos centrales a partir de CO_2. El nuevo modelo integra el uso de la energía UV canalizada por minerales semiconductores para producir reacciones fundamentales del metabolismo con CO_2 y moléculas orgánicas, que de otro modo serían inviables. El modelo postula no sólo la fijación de carbono, sino su evolución en el metabolismo que conocemos en el presente, por medio de un ciclo metabólico abiótico que funcionó en el medioambiente anteriormente a la aparición de las enzimas. ¿Quiere decir esto que el metabolismo universal en semiconductores es anterior a las enzimas y también al ARN? Lo que se conoce hasta ahora es que en base a las observaciones de la vida de los quimiolitótrofos, hubo al menos una célula, la original, quizás el último ancestro común en el árbol de la vida, que reunía simultáneamente un sistema metabólico con uno genético. Esto tiene que haber ocurrido de algún modo, y no sería descabellado pensar que esto ocurrió en las primeras protocélulas que utilizaron estas reacciones, sin ATP, y que luego evolucionaron permitiendo polimerizaciones.

Para el lector más interesado en los modelos del origen de la vida, existen también el mundo de los tioésteres (de Duve, 1991) y el escenario de Eschenmoser (2007). En este capítulo solamente se presentaron algunos de los modelos sobre el origen de la vida de los muchos descriptos en la literatura.

5. Ejercicios

- ¿Cuál es la diferencia entre una vaca viva y una que acaba de morir? Ambas tienen la misma cantidad de ARN y ADN, y todas las reacciones que involucran a los ácidos nucleicos siguen activas por un tiempo. ¿Por qué la vaca muerta está muerta?

- ¿Está usted de acuerdo con la realización de experimentos para verificar los modelos del metabolismo sin enzimas que se presentaron en este capítulo? ¿Agregaría o modificaría algo?
- La misión espacial de la NASA con el telescopio Kepler fue lanzada al espacio el 6 de marzo de 2009 para buscar planetas similares a la Tierra. En los próximos 3 a 5 años va a reunir gran cantidad de información científica acerca de la presencia de planetas de tamaño similar al nuestro y que estén situados a una distancia de su estrella que permita la presencia de agua líquida en la superficie. Si el costo aproximado de la misión es de U$S 500 millones, y el costo de un hospital completamente equipado puede llegar a los U$S 100 millones en Argentina o España, ¿considera que la misión es una buena inversión? ¿Adónde invertiría usted el dinero?
- Para un sistema en equilibrio, la concentración de un gas en solución, expresada como su presión parcial P_i, está dada por la ley de Henry: $P_i = K_i\, x_i$, donde K_i es la constante de equilibrio de la especie *i* entre las fases líquida y gaseosa, y xi es la fracción molar de la especie *i*. Si para el CO_2 a 25 ºC, $K_i = 0{,}167 \times 10^9$ Pa, y luego de reordenarla considerando que la concentración de CO_2 disuelta $[CO_2](g)$ es mucho menor que la concentración de agua $[H_2O] = 55{,}5$ M, la expresión que puede ser usada para calcular la concentración de este gas disuelto en el océano es:

$$[CO_2]_{(g)} = \frac{P_{CO_2}[55.5]}{0{,}167 \times 10^9}\, mol\, L^{-1}$$

  Calcular la concentración de CO_2 disuelto para una atmósfera pre-biótica con una relación de N_2 y CO_2 de 90:10 y una presión total de i) 1 y ii) 10 bar.

Referencias

Allwood, A.C., Walter, M.R., Kamber, B.S., Marshall, C.P. y Burch, I.W. Stromatolite reef from the early archaean era of Australia, *Nature,* vol. 441: 714, 2006.

Cairns-Smith, A.G. Takeover mechanisms and early biochemical evolution, *Biosystems,* vol. 9: 105, 1977.

Cairns-Smith, A.G. Precambrian solution photochemistry, inverse segregation, and banded iron formations, *Nature,* vol. 276: 807, 1978.

Cairns-Smith, A.G., Hall, A.J. y Russell, M.J. Mineral theories of the origin of lie and an iron sulfide example, *Orig. Life Evol. Biosph*, vol. 22: 161, 1992.

Cammack, R. *Oxford dictionary of biochemistry and molecular biology,* Oxford, Oxford University Press, 2006.

Cleaves, H.J., Chalmers, J.H., Lazcano, A., Miller, S.L. y Bada, J.L. A reassessment of prebiotic organic synthesis in neutral planetary atmospheres, *Orig. Life Evol. Biosph.,* vol. 38: 105, 2008.

Cody, G.D., Boctor, N.Z., Filley, T.R., Hazen, R.M., Scott, J.H., Sharma, A. y Yoder, H.S. Primordial carbonylated iron-sulfur compounds and the synthesis of pyruvate, *Science,* vol. 289: 1337, 2000

De Duve, C. *Blueprint for a Cell: The Nature and the Origin of Life*, Oxford, Oxford University Press, 1991.

Deamer, D.W. Role of amphiphilic compounds in the evolution of membrane-structure on the early Earth, *Orig. Life Evol. Biosph.,* vol. 17: 3, 1986.

Eschenmoser, A. The search for the chemistry of life's origin, *Tetrahedron,* vol. 63: 12821, 2007.

Feher, T., Papp, B., Pal, C. y Posfai, G. Systematic Genome Reductions: Theoretical and Experimental Approaches, *Chem. Rev.,* vol. 107: 3498, 2007.

Forster, A.C. y Church, G. Towards synthesis of a minimal cell, *Mol. Syst. Biol.,* vol. 2, 2006

Gilbert, W. The ARN World, *Nature,* vol. 319: 618-618, 1986.

Guzmán, M.I. y Martin, S.T. Oxaloacetate-to-malate conversion by mineral photoelectrochemistry: Implications for the viability of the reductive tricarboxylic acid cycle in prebiotic chemistry, *Int. J.* Astrobiol., vol. 7: 271, 2008.

Guzmán, M.I. y Martin, S.T. Prebiotic metabolism: Production by mineral photoelectrochemistry of α-ketocarboxylic acids in the reductive tricarboxylic acid cycle, *Astrobiology,* vol. 9, 2009.

Holm, N.G., Cairns-Smith, A.G., Daniel, R.M., Ferris, J.P., Hennet, R.J.C., Shock, E.L., Simoneit, B.R. T. y Yanagawa, H. Marine hydrothermal systems and the origin of life: future research, *Orig. Life Evol. Biosph.,* vol. 22: 181, 1992.

Horowitz, N. y Miller, S. En *Progress in the Chemistry of Natural Products,* Zechmeister, L. (Ed.), Springer Verlag, 1962.

Huber, C. y Wachterschauser, G. a-Hydroxy and a-amino acids under possible hadean, volcanic origin-of-life conditions, *Science,* vol. 314: 630, 2006.

Huber, C. y Wachtershauser, G. Activated acetic acid by carbon fixation on (Fe,Ni) S under primordial conditions, *Science,* vol. 276: 245, 1997.

Huber, H., Gallenberger, M., Jahn, U., Eylert, E., Berg, I.A., Kockelkorn, D., Eisenreich, W. y Fuchs, G. A dicarboxylate/4-hydroxybutyrate autotrophic carbon assimilation cycle in the hyperthermophilic Archaeum Ignicoccus hospitalis, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.,* vol. 105**:** 7851, 2008.

Kasting, J.F. Earths early atmosphere, *Science,* vol. 259: 920, 1993.

Luisi, L.P., Ferri, F. y Stano, P. Approaches to semi-synthetic minimal cells: a review, *Naturwissenschaften,* vol. 93: 1, 2006.

Luisi, P.L. *The Emergence of Life: From Chemical Origins to Synthetic Biology,* Cambridge, Cambridge University Press, 2006.

Menor-Salvan, C., Ruiz-Bermejo, M., Guzmán, M.I., Osuna-Esteban, S. y Veintemillas-Verdaguer, S. Synthesis of Pyrimidines and Triazines in Ice: Implications for the Prebiotic Chemistry of Nucleobases, *Chem. Eur. J.,* vol. 15: 4411, 2009.

Miller, S.L. A production of amino acids under possible primitive earth conditions, *Science,* vol. 117: 528, 1953.

Morowitz, H.J., Deamer, D.W. y Smith, T. Biogenesis as an evolutionary process, *J. Mol. Evol.,* vol. 33: 207, 1991.

Morowitz, H.J., Heinz, B. y Deamer, D.W. The chemical logic of a minimum protocell, *Orig. Life Evol. Biosph.,* vol.18: 281, 1988.

Morowitz, H.J., Kostelnik, J.D., Yang, J. y Cody, G.D. The origin of intermediary metabolism, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.,* vol. 97: 7704, 2000.

Orgel, L.E. Self-organizing biochemical cycles, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.,* vol. 97**:** 12503, 2000.

Orgel, L.E. Prebiotic chemistry and the origin of the ARN world, *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.,* vol. 39: 99, 2004.

Oró, J. y Kimball, A.P. Synthesis of purines under possible primitive Earth conditions. 1. Adenine from hydrogen cyanide. *Arch. Biochem. Biophys.,* vol. 94: 221, 1961.

Oró, J. **y Kimball, A.P.** Synthesis of purines under possible primitive Earth conditions. 2. Purine intermediates from hydrogen cyanide. *Arch. Biochem. Biophys.,* vol. 96: 293, 1962.

Schopf, J.W. Microfossils of the early archean apex chert: New evidence of the antiquity of life. *Science,* vol. 260: 640, 1993.

Shapiro, R. *Origins: a Skeptic's Guide to the Creation of Life on Earth*, Nueva York, Summit Books, 1986.

Shapiro, R. Small molecule interactions were central to the origin of life. *Q. Rev. Biol.,* vol. 81: 105, 2006.

Smith, E. y Morowitz, H.J. Universality in intermediary metabolism, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.,* vol. 101: 13168, 2004.

Szostak, J.W., Bartel, D.P. y Luisi, P.L. Synthesizing life, *Nature,* vol. 409: 387, 2001.

Thauer, R.K. A fifth pathway of carbon fixation, *Science,* vol. 318: 1732, 2007.

Wachtershauser, G. Before Enzymes and Templates. Theory of Surface Metabolism, *Microbiol. Rev.,* vol. 52: 452, 1988.

Wachtershauser, G. The Case for the Chemoautotrophic Origin of Life in an Iron-Sulfur World, *Orig. Life Evol. Biosph,* vol. 20: 173, 1990a.

Wachtershauser, G. Evolution of the 1st Metabolic Cycles, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.,* vol. 87**:** 200, 1990b.

Wachtershauser, G. Life as we don't know it, *Science,* vol. 289: 1307, 2000.

Wachtershauser, G. On the chemistry and evolution of the pioneer organism, *Chem. Biodiv.,* vol. 4: 584, 2007.

Zhang, X. V. y Martin, S. T. Driving parts of Krebs cycle in reverse through mineral photochemistry, *J. Am. Chem. Soc.,* vol. 128: 16032, 2006.

Capítulo 11

El origen y la evolución temprana de la vida

Antonio Lazcano Araujo

Resumen A pesar de que Charles Darwin nunca abordó en público el problema del origen de la vida, su teoría generó el marco de referencia conceptual que llevó durante la década de los 20's a A.I. Oparin y a J.B.S. Haldane a proponer la idea de un origen heterótrofo de la vida. No fue sino hasta 1953, el mismo año en que se publicó el modelo de la doble hélice del ADN cuando Stanley L. Miller, a la sazón un joven estudiante del laboratorio de Harold C. Urey, dio a conocer los resultados de un experimento en donde simuló las condiciones de la Tierra primitiva y demostró que en una atmósfera altamente reductora con metano, amoniaco, hidrógeno y agua se podían sintetizar eficientemente aminoácidos y otros compuestos orgánicos de interés bioquímico. Este experimento, así como los que lo siguieron, inauguró lo que hoy conocemos como química prebiótica y, como se discutirá, abrió la posibilidad de estudiar en el laboratorio la aparición y evolución temprana de la vida.

Abstract Although Carles Darwin never discussed in public the problem of the origin of life, his theory generated a conceptual frame of reference which, during the decade of the 1920s, led A.I. Oparin and J.B.S. Haldane to propose the idea of a heterotrophic origin of life. It wasn't until 1953, the same year that the double-helix model of the ADN was published, that Stanley L. Miller, a young student from the laboratory of Harold C. Urey revealed the results of an experiment where he simulated the conditions of the primitive Earth and demonstrated that in a highly reductive atmosphere with methane, ammonia, hydrogen and water, aminoacids and other compounds of biochemical interest could be synthesised. This experiment, as well as subsequent similar ones, inaugurated what we nowadays know as prebiotic chemistry and, as will be discussed in this chapter, opened the possibility of studying in the laboratory the emergence and early evolution of life.

Antonio Lazcano Araujo (✉)
Facultad de Ciencias, UNAM, Apdo. Postal 70-407
Cd. Universitaria 04510, México D.F., MEXICO
alar@correo.unam.mx

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 249 - 263, © 2010 UNESCO-Montevideo.

1. Introducción

Aunque Darwin no tenía gustos culinarios muy sofisticados, dejó al menos dos recetas de cocina. Una de ellas, escrita por su propia mano en el libro de recetas de su esposa Emma, describe como cocinar el arroz muy a la inglesa: "se pone al fuego un recipiente con agua y sal, y cuando comience a hervir se agrega el arroz moviendo constantemente. Se mantiene así durante exactamente doce minutos, y cuando este tiempo haya transcurrido se tira el agua y el cazo con el arroz se deja durante diez minutos sobre carbonos encendidos –al cabo de éste tiempo el arroz estará listo para ser consumido." La otra receta es mucho más ambiciosa, y Darwin la incluyó en una carta que envió a su amigo Joseph Dalton Hooker el 1º de Febrero del 1871. "A menudo se afirma", escribió Darwin, "que las condiciones necesarias para la formación del primer organismo están ahora presentes, como lo estuvieron antes. Pero sí (¡y que *sí* tan grande!) pudiéramos imaginar la existencia de un pequeño charco caliente en donde estuvieran presentes todo tipo de sales amoniacales y fosfóricas, y hubiera luz, calor, electricidad, etc., disponibles, que se pudiera formar químicamente una proteína, lista para sufrir cambios que la hicieran aún más compleja, en nuestros días un compuesto así sería instantáneamente devorada o absorbida, lo cual no hubiera ocurrido antes de que surgieran los primeros organismos…"

Si bien Darwin se mostró siempre reacio a discutir en público el origen de la vida, la carta que le envió a Hooker muestra que él mismo tenía conciencia de que su teoría proporcionaba el marco de referencia necesario para comprender como habían aparecido los primeros seres vivos. ¿Existieron los charcos primordiales que Darwin imaginó? ¿Cuándo aparecieron los primeros seres vivos en nuestro planeta? No sabemos a ciencia cierta cuál es la respuesta a estas preguntas. Sin embargo, en los últimos veinte años la presencia de una serie de estructuras que muchos han interpretado como fósiles, junto con los datos que indican un fraccionamiento isotópico que se puede interpretar como evidencia de distintos metabolismos microbianos, han llevado a un número cada vez mayor de investigadores a sugerir que hace unos 3.5 mil millones de años el planeta ya se encontraba poblado por una microbiota extraordinariamente diversificada.

Ello no significa, sin embargo, que para explicar este fenómeno necesitemos que la vida haya aparecido mucho antes –conocemos bien, por ejemplo, la rapidez con la que las bacterias y otros microorganismos evolucionan adaptándose a los antibióticos —y es factible que el surgimiento y la diversifica-

ción de los primeros procariontes haya requerido unos cuantos millones de años. Desafortunadamente, el problema más severo que tenemos que enfrentar es el de la ausencia de rocas sedimentarias de más de 3.5 mil millones de años. Es decir, el registro geológico no nos permite, al menos por el momento, reconstruir las condiciones ambientales que tenía la Tierra cuando apareció la vida: no conocemos cuál era la composición de la atmósfera terrestre, la temperatura de la superficie de nuestro planeta, o la extensión de los mares primitivos. No es de extrañar, pues, que esta situación haya llevado al desarrollo de explicaciones diferentes (e incluso antagónicas) sobre la naturaleza de los primeros seres vivos y los procesos que llevaron a su origen. A pesar de tales incertidumbres, una serie de evidencias que van desde la observación y estudio de las nubes de material interestelar en donde se están formando estrellas y planetas, hasta la simulación experimental de las condiciones de la Tierra primitiva, sugieren que la vida surgió en nuestro planeta como resultado de la evolución de sistemas de compuestos orgánicos que se acumularon en la superficie de nuestro planeta como resultado de síntesis abióticas y de choques con cometas y meteoritos. Esta idea, que hoy es conocida como la hipótesis heterótrofa del origen de la vida, fue propuesta en 1924 por un joven bioquímico ruso, Alexander I. Oparin, y a pesar de la resistencia con la que se topó inicialmente, lentamente fue ganando impulso hasta transformarse en la mejor explicación de la aparición de la biosfera.

2. Oparin y la sopa primitiva

La publicación en 1859 del libro *El origen de la especies* de Charles Darwin marcó un hito en la historia no sólo de la biología sino del pensamiento occidental mismo. El impacto de la obra de Darwin fue tan poderoso que su influencia muy pronto alcanzó muchas áreas de la cultura, impulsando el desarrollo de ideas e hipótesis que comenzaron a plantearse en el seno de un marco de referencia evolutivo. Aunque no lo dijo en forma explícita, al igual que Lamarck, Darwin dejaba abierta la posibilidad de que los primeros organismos hubieran surgido como resultado de la generación espontánea.

Algunos de los seguidores de Darwin, como el célebre biólogo alemán Ernst Haeckel, no tardaron en reprocharle su silencio sobre los mecanismos que habían llevado al origen de la vida. Empujado por la sorprendente habilidad de algunos microorganismos como las euglenas, que lo mismo pueden

llevar a cabo la fotosíntesis que, en la obscuridad, comportarse como heterótrofos y nutrirse de compuestos orgánicos disponibles en su entorno, Haeckel propuso que los primeros seres vivos habían sido similares a las euglenas –es decir, que la vida primigenia había surgido dotada de capacidades fotosintéticas.

No todos aceptaron ésta idea. A pesar de la enorme influencia que las enseñanzas de Haeckel habían tenido en el Imperio Ruso, y que se prolongó hasta luego de la revolución que acabó con el régimen zarista, Alexander I. Oparin, un joven bioquímico recién egresado de la Universidad de Moscú, propuso en 1924 que los primeros seres vivos habían sido heterótrofos anaerobios que se formaron y nutrieron a partir de los compuestos orgánicos sintetizados en la Tierra primitiva, y que se habían acumulado en los mares del planeta formando lo que conocemos como la sopa prebiótica.

¿Cuál es el origen de la propuesta de Oparin? Desde que era un joven estudiante él había mostrado un enorme interés en el fenómeno de la fotosíntesis, lo que lo llevó a trabajar con A. N. Bakh, el fundador de la bioquímica soviética. Al mismo tiempo, Oparin fue invitado a participar en las reuniones que Arkadi K. Timiriazev, el principal difusor de las ideas de Darwin en el Imperio Ruso, organizaba semana a semana en su departamento de Moscú. Al igual que todos los estudiantes de su generación, Oparin había sido educado en la idea de que los primeros organismos habían sido fotosintéticos –lo cual, como afirmaba Oparin, estaba en abierta contradicción con su visión darwinista, porque le resultaba imposible reconciliar la complejidad del metabolismo fotosintético, con la idea de una evolución gradual de los procesos biológicos. Así, Oparin se vio obligado a suponer que antes de la aparición de la vida se había dado la síntesis y acumulación de moléculas orgánicas, de cuya evolución habían surgido sistemas pre celulares cuya evolución llevó a los primeros microorganismos. Según Oparin, la formación de las moléculas orgánicas precursoras de los primeros seres había sido posible gracias a la ausencia de oxígeno libre en la atmósfera terrestre, que no se había comenzado a ver en nuestro planeta sino hasta la aparición, muchos millones de años después del origen de la vida, de los primeros microorganismos fotosintéticos.

Para apoyar su visión evolutiva, Oparin se asomó no sólo a la información astronómica disponible, que ya había demostrado la presencia de compuestos orgánicos en algunos meteoritos, y de moléculas simples como HCN en el espectro de cometas, sino que también analizó la rica tradición de la química orgánica, que desde su nacimiento con los experimentos de Wohler en 1828 había demostrado la posibilidad de sintetizar urea, azúcares, hidrocarburos y

aún aminoácidos en ausencia de seres vivos. El resultado fue un esquema evolutivo extraordinariamente convincente que completó con los coacervados, unas gotitas microscópicas que en la época eran considerados como los mejores modelos fisicoquímicos del protoplasma, como se conocía en la época al interior celular, y que Oparin supuso habían precedido a las primeras células. Aunque las ideas de Oparin se toparon con un cierto rechazo, su discusión quedó limitada en buena medida a la Unión Soviética –había escrito en ruso, una lengua que pocos científicos occidentales conocían —y las diferencias políticas entre la URSS y los demás países ciertamente no facilitaban su difusión. No fue sino hasta 1938 cuando apareció una edición estadounidense de la obra de Oparin, pero aún así habrían de pasar 15 años antes de se intentara probar experimentalmente la validez de su teoría.

3. La química prebiótica

En 1952 apareció publicado un artículo sobre la evolución de la atmósfera terrestre escrito por Harold C. Urey, un distinguido químico estadounidense que había recibido el premio Nobel por su descubrimiento del deuterio y que se encontraba por ese entonces en la Universidad de Chicago. Ese mismo año Stanley L. Miller, un joven estudiante que había comenzado sus estudios de doctorado en dicha institución, escuchó a Urey hablar de sus modelos de la atmósfera primitiva, y al cabo de unas cuantas semanas se le acercó y le pidió que lo asesorara para llevar a cabo una simulación de los procesos químicos que habían llevado a la síntesis de compuestos orgánicos necesarios, según las ideas de Oparin, para la aparición de la vida. Aunque a Urey no le gustó el proyecto, eventualmente aceptó dirigir a Miller, el cual puso manos a la obra diseñando tres aparatos relativamente simples en donde se simulaban la Tierra primitiva con todo y descargas eléctricas. Los aparatos construidos por Miller estaban lejos de corresponder a la compleja estructura de los ambientes terrestres primitivos. Sin embargo, al someter a la acción de descargas eléctricas una mezcla de gases formada por metano, amoniaco, hidrógeno y vapor de agua, Miller pudo observar cómo se formaban aminoácidos, hidroácidos, urea y otras moléculas de interés bioquímico.

El interés que despertaron los resultados reportados por Miller fue extraordinario: bastaban unos cuantos días para obtener, en condiciones que parecían simular las de la Tierra primitiva, algunos de los compuestos esenciales

para la vida. El trabajo de Miller, que fue publicado en 1953, apareció pocas semanas después que el modelo de la doble hélice del ADN de Watson y Crick, y en rigor inauguró el estudio experimental del origen de la vida. Muy pronto fue seguido por otros experimentos similares, dando pues origen a lo que hoy en día conocemos como química prebiótica. Sin duda alguna el avance más significativo en este campo no ocurrió sino hasta 1960, cuando Joan Oró, un químico catalán avecindado en Houston, demostró que la condensación de cinco moléculas de ácido cianhídrico (HCN), una molécula que se formaba con facilidad en el experimento de Miller y que está presente en las nubes de material interestelar y en los núcleos de cometas, se condensaban formando la adenina, una de las bases nitrogenadas presentes en el ADN, el ARN y el ATP, un nucleótido relativamente simple que juega un papel esencial en el metabolismo de todos los seres vivos.

A lo largo de los últimos cincuenta años los trabajos de Miller y Oró han sido no solamente confirmados por muchos otros investigadores, sino que han servido para demostrar la facilidad con la que podemos sintetizar las pirimidinas (que son las bases complementarias a las purinas, la categoría a la cual pertenece la adenina), azúcares, lípidos y muchas moléculas más de interés biológico. Podemos obtener compuestos catalíticos que ayudan a unir aminoácidos, cadenas de nucleótidos, y hasta moléculas lipídicas, que en contacto con el agua forman sistemas conocidos como las micelas y los liposomas, que poseen en su interior un medio acuoso y que pueden haber sido precursores de las células actuales. Aunque desafortunadamente carecemos de pruebas directas de la existencia de la sopa primitiva, la eficiencia con la que se pueden formar un gran número de monómeros bioquímicos y, en algunos casos, de oligómeros como péptidos relativamente simples, ciertamente apoya las ideas de Oparin.

Existe una evidencia adicional que puede ser utilizada para apoyar la idea de una sopa primitiva. En Septiembre de 1969 cayó en Australia un meteorito que resultó tener la edad misma del sistema solar: 4600 millones de años. Este pequeño cuerpo, que hoy conocemos como el meteorito de Murchison, fue analizado con todo rigor gracias a los laboratorios que se habían montado para estudiar las muestras lunares. Los resultados de estos estudios han sido espectaculares: el meteorito Murchison posee hidrocarburos tanto lineales como aromáticos, pero también cerca de 80 aminoácidos, bases purinicas y pirimidinicas, ácidos carboxílicos, moléculas capaces de formar membranas de doble capa y compuestos derivados de azúcares, entre muchos otros. Aunque carecemos de una muestra de la sopa primitiva, el análisis del Murchi-

son muestra que hace 4600 millones de años, cuando se estaban formando la Tierra y otros planetas, en el sistema solar ocurrían una serie de procesos químicos que permitían la síntesis y acumulación de compuestos orgánicos, lo cual ciertamente apoya la idea de que en nuestro planeta ocurrían procesos similares. Más aún, la caída del Murchison sugiere que la sopa primitiva pudo haber sido sazonado con material orgánico extraterrestre que llegó a nuestro planeta a bordo de cometas, meteoritos y asteroides, enriqueciendo el medio ambiente prebiótico con una enorme cantidad y diversidad de moléculas de importancia bioquímica.

4. La asimetría que llegó del cielo

Si bien es cierto que la presencia de compuestos orgánicos en algunos meteoritos se conocía desde mediados del siglo XIX, no fue sino hasta los últimos treinta años cuando el extraordinario desarrollo de las técnicas analíticas y de los laboratorios montados para el estudio de las muestras lunares permitió caracterizar con un grado de precisión extraordinario las moléculas presentes en las llamadas condritas carbonáceas, que incluyen hidrocarburos, ácidos carboxílicos, alcoholes, purinas, pirimidinas y, por supuesto, aminoácidos. El estudio de los compuestos orgánicos presentes en el meteorito Murchison nos permiten estudiar los procesos químicos que se daban en el Sistema Solar cuando se estaban formando los planetas y, de hecho, constituyen un modelo de las reacciones que pudieron haber ocurrido en la Tierra misma antes de la aparición de la vida.

Se han identificado cerca de 80 aminoácidos diferentes en el meteorito Murchison, y tanto su composición isotópica como la presencia de muchos aminoácidos no proteínicos nos permiten afirmar, con un grado de certeza considerable, que se originaron por procesos no biológicos. Esta conclusión es subrayada, de hecho, por la presencia de mezclas racémicas de aminoácidos, que indica que estos compuestos no son contaminantes terrestres. Hace poco más de diez años John Cronin y Sandra Pizzarello demostraron que no todos los aminoácidos se encontraban en proporciones racémicas, sino que se podía medir un exceso de la forma L de varios de a-aminoácidos metilados, incluyendo isovalina, a-metil-norvalina, a-metil-valina, y la a-metil-isoleucina. Aunque el exceso de la a-metil-norvalina y la a-metil-valina es de apenas un 2.8%, la L-isovalina y la L-a-metil-isoleucina tienen una sorpren-

dente abundancia de 15 y 7% más que su isómero D. Lo sorprendente de este descubrimiento es que estos aminoácidos ni son proteínicos ni son productos metabólicos, por lo que se puede excluir la posibilidad de una contaminación por organismos terrestres.

No sabemos cuál es el origen de las abundancias de L-aminoácidos detectadas por Cronin y Pizzarello en los meteoritos. Sin embargo, se ha sugerido que la luz polarizada circular proveniente de un remanente de supernova haya incidido en el espacio exterior sobre el cuerpo parental de los meteoritos y haya fotolizado en forma preferencial uno de los enantiómeros de los aminoácidos, produciendo así los excesos observados. Como lo muestra la superficie lunar, que conserva las huellas de la gran cantidad de colisiones de cuerpos que chocaron contra ella hace unos cuatro mil millones de años, es fácil suponer que la Tierra primitiva sufrió un proceso similar, lo que indica que una gran cantidad de aminoácidos extraterrestres (con todo y sus excesos quirales) se incorporaron al medio ambiente prebiótico.

¿Jugaron éstos aminoácidos extraterrestres algún papel en las síntesis de compuestos que precedieron la aparición de la vida? Se sabe que la condensación del glicoaldehído produce una serie de azúcares en una reacción que muchos creemos pudo haber originado carbohidratos en la Tierra primitiva. Como ocurre con toda síntesis orgánica, los productos son mezclas racémicas. Con el propósito de estudiar el papel de los aminoácidos asiméricos en procesos prebióticos, Sandra Pizzarello y Arthur Weber decidieron estudiar la influencia de distintos aminoácidos en la condensación del glicoaldehído. Los resultados de estos experimentos, publicados hace cinco años, fueron espectaculares: aunque la prolina no tuvo efecto alguno, tanto la L-alanina, que se encuentra en las proteínas de todos los seres vivos, como la L-2-isovalina, que se encuentra en condritas carbonáceas, resultaron ser catalizadores asimétricos que favorecieron la síntesis preferencial de D-azúcares. Experimentos subsecuentes con dipéptidos homoquirales sencillos demostraron que estas moléculas, cuya presencia en la Tierra primitiva no es difícil de imaginar, son catalizadores estereoespecíficos extraordinariamente eficientes.

Los experimentos de Pizzarello y Weber se deben ver a la luz de otros resultados recientes igualmente espectaculares. Hace unos pocos años el grupo de Ronald Breslow demostró que al someter soluciones de aminoácidos metilados a ciclos sucesivos de evaporación y rehidratación era posible amplificar hasta un 90% excesos iniciales relativamente pequeños de las formas L. En un trabajo reciente publicado por Mildy Levine y otros colegas del grupo de Breslow, se pudieron producir excesos del 37, 23 y 20% de las formas L de

la fenilalanina, la valina y la alanina, respectivamente, si se agregaba cobre y otros L-aminoácidos, a una solución sometida a evaporaciones cíclicas. Es decir, los a-metil-aminoácidos extraterrestres son catalizadores estereoespecíficos cuya asimetría puede ser transferida a aminoácidos en condiciones que simulan las de la Tierra primitiva.

5. El mundo del ARN

¿Cómo se dio la evolución de la vida a partir de la sopa primitiva? Luego de que el modelo de la doble hélice del ADN de Watson y Crick fue aceptado, y de que se comprendió que las secuencias de los aminoácidos de las proteínas se encuentran codificadas en el ADN mismo, el campo del origen de la vida se dividió en dos grandes grupos. En un lado se encontraban los que sostenían que lo primero en surgir había sido el ADN, que se replica y almacena la información genética, pero había un grupo igualmente numeroso que sostenía que las proteínas habían aparecido primero, ya que son los catalizadores más conspicuos de los procesos bioquímicos básicos y que son indispensables para la replicación misma de los ácidos nucleicos. Es cierto que había quienes sugerían que los primeros seres vivos habían resultado de la coevolución de ambos tipos de moléculas, pero esta alternativa tampoco parecía resolver el problema.

No fue sino hasta 1967 cuando Carl Woese sugirió que antes que el ADN y las proteínas había surgido el ARN, una idea que también fue propuesta un año más tarde de manera independiente por Francis Crick y por Leslie Orgel. A pesar del enorme prestigio de estos tres científicos, muchos desdeñaban esta posibilidad por considerarla una especulación sin fundamento. No fue sino hasta 1982 cuando los grupos de Thomas Cech y Sidney Altman descubrieron, de manera casi accidental, que el ARN poseía en efecto propiedades catalíticas. Es decir, el ARN es un ácido nucleico que puede almacenar información genética, pero también se comporta como las proteínas y cataliza diversas reacciones bioquímicas.

El descubrimiento de la existencia de moléculas de ARN catalítico, también llamadas ribozimas, ha permitido conceptualizar el llamado mundo del ARN y diseñar experimentos que simulan lo que pudo haber ocurrido en la Tierra primitiva. El repertorio de actividades catalíticas del ARN es verdaderamente asombroso. A principios del 2009, por ejemplo, Lincoln y Joyce

aislaron ribozimas que pueden leer cadenas sencillas de ARN y forman una cadena complementaria, la cual a su vez puede catalizar la formación de otro ARN. Es decir, existen evidencias empíricas que demuestran que es posible la replicación del ARN en ausencia de enzimas. Otros investigadores, como Jack Szostak han logrado introducir ribozimas al interior de liposomas que empiezan a funcionar como pequeños reactores químicos y polimerizan nucleótidos.

La caracterización de las propiedades de las ribozimas ha modificado en forma profunda varios conceptos de la biología molecular al demostrar, por ejemplo, que la formación del enlace peptídico que une a los aminoácidos en el interior del ribosoma es catalizada no por las proteínas ribosomales, sino por el ARN mismo. Desde una óptica evolutiva, estos resultados tienen implicaciones profundas. Por una parte, simplifican enormemente el estudio del origen de la vida, ya que vuelven plausible la idea de un mundo de ARN, en donde la catálisis de procesos ancestrales dependía de ribozimas, y al mismo tiempo indican, por ejemplo, que la síntesis de proteínas (y el código genético mismo, en consecuencia) es un producto de la evolución del mundo del ARN.

Sin embargo, al mismo tiempo estos descubrimientos nos plantean dudas nuevas. Sabemos que el ARN es una molécula extraordinariamente inestable, y que sus propiedades catalíticas y replicativas difícilmente pudieron haber aparecido repentinamente en los mares primitivos. ¿De dónde surgió el mundo del ARN? Aunque es posible que existan procesos químicos aún desconocidos que faciliten la formación de moléculas de ARN y que lo estabilicen, una idea que ha comenzado a extenderse entre muchos de quienes se dedican al estudio del origen de la vida es la de que el ARN pudo haber sido precedido por mundos más sencillos, es decir, que el ARN mismo sea el producto de la evolución de biosferas basadas en mundos de pre-ARN que dependían de moléculas catalíticas formadas por compuestos que podían almacenar información genética pero que no eran ni ADN ni ARN. Aunque no sabemos si esta posibilidad es correcta, el poder plantearla es un ejercicio intelectual extraordinario que puede tener consecuencias científicas (y prácticas) de enorme importancia. Y, por supuesto, este tipo de ejercicios son precisamente uno de los factores que vuelven tan atractivo el aproximarse a problemas centrales de la ciencia como el del origen de la vida.

La posibilidad de que la síntesis de proteínas haya surgido en el mundo de ARN se ve apoyada por una serie de evidencias moleculares de enorme peso, entre las que de destacan las muchas interacciones que se conocen entre

distintos aminoácidos y las ribozimas. Sin embargo, la evidencia más impresionante proviene de la estructura misma de los ribosomas, los organelos celulares en donde se lleva a cabo la síntesis de proteínas. Al dilucidar la estructura cristalina de los ribosomas, quedó perfectamente claro que el sitio en donde se lleva a cabo la formación del enlace peptídico entre dos aminoácidos es un lugar en donde no hay proteínas ribosomales, sino unicamente ARN –es decir, es el ARN mismo es el que está catalizando la formación de cadenas de aminoácidos. Ello implica que estamos atestiguando la preservación evolutiva, por un periodo de casi cuatro mil millones de años, de una propiedad de las ribozimas que nos indica que la síntesis de proteínas surgió en un mundo en donde el ARN era el principal catalizador biológico, y que dio origen a células que aún carecían de ADN.

¿Cuándo y cómo surgió el ADN? A diferencia del ARN, que es una molécula de una enorme fragilidad, la doble hélice del ADN se caracteriza por estabilidad química considerable. Esta propiedad, de hecho, nos permite entender su origen, ya que el almacenar la información genética en un polímero poco reactivo aumenta considerablemente la fidelidad de su transmisión hereditaria. Los mecanismos de síntesis del ADN están extraordinariamente conservados entre todos los organismos estudiados, lo cual sugiere que la línea biológica ancestral de donde surgieron las especies contemporáneas estaba formada por células que ya poseían ADN, ARN y proteínas. La vida, tal como la conocemos hoy en día a nivel bioquímico, evolucionó en forma tan rápida, que todo indica que hace unos tres mil quinientos millones de años muchas de los mecanismos moleculares ya habían surgido. La extraordinaria diversidad biológica que vemos no sólo en los seres vivos actuales, sino también en el registro fósil, nos habla del poder de adaptación y diversificación de estos ancestros de donde todos descendemos.

6. Los grandes linajes celulares

En 1977 Carl R. Woese y George E. Fox, que trabajaba en el laboratorio del primero en la Universidad de Illinois, publicaron un trabajo que resumía el resultado de las comparaciones de fragmentos del ARN de la subunidad pequeña de los ribosomas de diez especies de metanógenas, pequeños procariontes estrictamente anaerobios y sin citocromos que, como su nombre lo indica, liberan metano como resultado de un proceso quimiosintético que les permite

formar compuestos orgánicos a partir del dióxido de carbono. Al fragmentar el ARN ribosomal de las metanógenas y comparar los trozos resultantes con los de *Bacillus*, algunas enterobacterias, y varias cianobacterias (que son tres tipos de organismos bastante distantes entre sí evolutivamente) Woese y Fox descubrieron, para su sorpresa, que la distancia evolutiva entre estos tres grupos de bacterias era mínima respecto a la que las separaba del conjunto de las metanógenas. Es decir, la comparación de los fragmentos del ARN ribosomal permitía deducir la existencia de una divergencia biológica extraordinariamente antigua que dividía a los procariontes en dos grupos extraordinariamente distantes entre si.

Pocos meses más tarde Woese y Fox publicaron un trabajo adicional que no sólo confirmaba todos sus resultados previos, sino que también demostraba que la comparación de los ARN ribosomales de distintos eucariontes (conocidos como 18S rARN, por sus dimensiones) con los del 16S rARN de las metanógenas, por una parte, y bacterias como *Escherichia coli* y *Bacillus firmus* por otra, permitía agrupar a los seres vivos en tres grandes grupos que aunque tenían un origen común, estaban claramente diferenciados entre sí. Es decir, la comparación de los fragmentos del 16/18S rARN mostraba que los organismos estudiados, lejos de dividirse en plantas y animales o en procariontes y eucariontes, en realidad se agrupaban en tres grandes linajes o reinos primarios que divergían de un ancestro común. ¿Qué ocurrió durante la historia temprana de la vida, que llevó a la separación de los seres vivos en éstas tres grandes líneas evolutivas? ¿Cómo conciliar estos árboles evolutivos con los esquemas taxonómicos tradicionales? ¿Cuál era la naturaleza de los ancestros de estos tres grandes grupos de organismos? ¿Cuándo y dónde vivieron estos ancestros?

7. La búsqueda del ancestro común

Como argumentaron Woese y Fox desde 1977, es evidente que aunque los tres linajes celulares están separados por una enorme distancia evolutiva, todos ellos provienen de un ancestro común —pero la existencia de diferencias nada desdeñables, por ejemplo, en las modificaciones que sufren las bases de los rARNs y tARNs en cada uno de estos tres linajes les llevó a sugerir que el ancestro común era una entidad mucho mas simple que cualquier procarionte actual, en donde operaba una versión aún rudimentaria de la expresión de la

información genética. Es decir, Woese y Fox supusieron que en el punto de la trifurcación de los tres linajes celulares (o poco antes) había existido una entidad biológica hipotética a la que llamaron *progenote* y en la cual, a diferencia de lo que ocurre con los organismos contemporáneos, la separación evolutiva entre genotipo y fenotipo aún no se había completado del todo.

No era fácil aceptar esta idea. Es evidente que los organismos contemporáneos debieron haber sido precedidos por sistemas mucho más simples, pero la probabilidad de que el último ancestro común de las eubacteria, las arqueobacterias y el nucleocitoplasma de los eucariontes fuera un progenote resultaba difícil de conciliar con la complejidad de los procesos moleculares básicos de cada uno de los linajes. Por otro lado, aunque se pueden proponer esquemas evolutivos que conduzcan a la separación simultánea de tres o más linajes, los eventos de especiación suelen ser dicotómicos, es decir, de un grupo ancestral se derivan dos.

La biología evolutiva es hija de la biología comparada. Es decir, la comparación de las diferencias y similitudes que existen entre los tres linajes permite, en principio, conocer no sólo la relación evolutiva que guardan entre ellos, sino también las características de su ancestro, al que Walter Fitsch designó como *cenancestro*, un neologismo acuñado haciendo uso de un prefijo griego derivado del vocablo *koiné*, que se puede traducir como "común". Aunque hace una década las bases de datos eran muy limitadas y carecían de la riqueza de las que están disponibles en nuestros días, poseían la información suficiente para intentar asomarse a los rasgos del último ancestro común a las arqueobacterias (que hoy designamos como arqueas), las eubacterias (o bacterias) y los eucariontes. A pesar de las limitaciones de esta metodología (y que incluyen, en forma destacada, el problema del transporte horizontal de genes), los resultados indicaron que el cenancestro poseía la complejidad equivalente a la de cualquier procarionte contemporáneo, y que no era un progenote.

La reconstrucción de estadios ancestrales ha adquirido una perspectiva totalmente novedosa con la disponibilidad, a partir de 1995, de un número creciente de genomas celulares completamente secuenciados. Como habían afirmado desde 1965 Emile Zuckerkandl y Linus Pauling, la historia evolutiva de un organismo está contenida en su genoma —pero a menudo esta información es difícil de interpretar, debido a una serie de fenómenos biológicos que van desde la falta de preservación de la estructura primaria de las proteínas, hasta la existencia de niveles de redundancia de las secuencias cuya naturaleza no entendemos del todo, pasando por el transporte horizontal, una de las peores pesadillas que pueden enfrentar los biólogos.

Se puede afirmar que los genes del cenancestro estarían definidos por el conjunto de secuencias presentes en la intersección de los conjuntos que representan los genomas de las Archaea, las Bacteria y los Eucarya. Sin embargo, en la práctica esta reconstrucción se ha visto limitada por (a) el hecho de que los genomas secuenciados no representan la diversidad biológica real; (b) los distintos niveles de conservación de los genes, que distan mucho de ser los mismos para todas las secuencias; (c) los problemas para anotar, es decir, identificar a las secuencias presentes en las bases de datos; (d) la presencia de secuencias altamente conservadas cuya función es aún completamente desconocida por no disponer de datos experimentales; (e) la pérdida polifilética, es decir, independiente, de secuencias, funciones y rutas metabólicas que han sufrido diversos organismos, sobre todo parásitos y simbiontes; y (f) el transporte horizontal de genes que, como lo ha demostrado la comparación de muchos genomas celulares completamente secuenciados, en algunos casos puede llegar a traspasar las fronteras que separan a los grandes dominios.

Ante un inventario de dificultades como éste parecería ser imposible definir con precisión los rasgos del cenancestro. Sin embargo, algunos pensamos que el panorama es más alentador. Aunque el transporte horizontal de secuencias es un fenómeno real (que subyace, por ejemplo, a la bien conocida resistencia a antibióticos que se observa con una frecuencia cada vez mas alarmante entre muchos patógenos de humanos y otros animales) cuya frecuencia aun no se ha evaluado del todo, sabemos que no todos los genes tienen la misma probabilidad de ir de una especie a otra.

A pesar de la promiscuidad con la que los seres vivos han intercambiado genes a lo largo de la evolución, la reconstrucción del pasado es posible. Claro que los resultados no siempre son del todo compatibles, y los problemas parecen haberse agudizado con la disponibilidad de más de ochocientos genomas celulares completamente secuenciados. Al comparar las secuencias de los tres grandes linajes celulares, diversos grupos hemos descubierto que hay unos 140 genes comunes a todos los seres vivos. Muchas de estas secuencias corresponden a proteínas relacionadas, de una manera u otra, con el metabolismo del ARN. Es decir, sintetizan, degradan o se unen al ARN o a los ribonucleótidos que lo forman, lo que se puede interpretar como evidencia de la conservación evolutiva de proteínas que provienen de una época en la que los genomas celulares estaban formados por moléculas de ARN –luego del mundo del ARN, antes de la aparición de los genomas del ADN.

8. Conclusiones

Pocas tareas resultan tan complejas y difíciles en las ciencias biológicas como la reconstrucción del pasado. Si bien es cierto que en el marco de la teoría evolutiva es fácil aceptar la existencia de sistemas ancestrales más simples de los cuales descendemos los organismos actuales, su estudio no es una tarea fácil, sobre todo si hay que remontarse a épocas precámbricas. La reconstrucción de estadios ancestrales es una tarea multi e interdisciplinaria que tiene que recurrir, necesariamente, a actitudes eclécticas que apelen a metodologías que incluyen desde las discusiones sobre el medio ambiente primitivo, hasta la anotación automatizada de las secuencias de genomas completos. Los resultados pueden ser a veces confusos. Por ejemplo, la conservación de las secuencias de las ATPasas implica la existencia de membranas de lípidos y fosfolípidos, aunque desconocemos cual era la naturaleza química de éstas últimas.

A pesar de estas dificultades, resulta asombroso que, por un lado, podamos sintetizar en forma rápida y eficiente, gracias a experimentos como el de Miller-Urey, algunas de las moléculas que juegan un papel esencial en los procesos biológicos. Todo indica que el ARN jugó un papel esencial, si no en el origen de la vida misma, al menos en etapas muy tempranas de la evolución biológica. Por otro lado, es sorprendente que existan secuencias, estructuras y funciones, como las que participan en la lectura y expresión de la información genética, que parecen haberse conservado a lo largo de miles de millones de años. La lectura de estas crónicas moleculares que se han mantenido desde épocas precámbricas nos permite asomarnos, aunque sea en forma limitada, al interior de los procesos biológicos de los microorganismos que antecedieron a todas las formas de vida que existen hoy en nuestro planeta, aunque no nos permiten predecir hacia donde va la biosfera. Después de todo, no hay que olvidar que los evolucionistas somos como el ave *goofus* que describió Jorge Luis Borges, que vuela con la cabeza hacia atrás, porque no le interesa saber hacia donde va, sino de donde viene.

Capítulo 12

Teoría evolutiva: fundamentos, impactos y debates

Alicia Massarini

Resumen La Teoría Evolutiva es, sin duda, el paradigma que estructura e integra la biología moderna. Desde que Darwin propuso en 1859 el proceso de selección natural como mecanismo causal de la evolución biológica, la teoría ha sido enriquecida por los aportes de diversas ramas de la biología. En ese camino, las ideas evolucionistas han impactado en múltiples disciplinas y campos del conocimiento, en el ámbito de la investigación, la producción, la salud y la cultura, especialmente, en la imagen que los humanos tenemos de nosotros mismos. Sin embargo, como en toda construcción científica, el desarrollo de la Teoría de la Evolución no ha sido lineal. En estos 150 años, el darwinismo original se ha enriquecido y también ha transitado por crisis y etapas de intenso debate. El objetivo de este trabajo es presentar una reseña histórica acerca de la constitución de este marco teórico, sus principales fundamentos, impactos y debates. Finalmente se considerará su relevancia e implicaciones en el campo de la indagación del origen de la vida y de la búsqueda de vida en lejanos escenarios cósmicos.

Abstract The Theory of Evolution is, undoubtedly, the paradigm that structures modern biology. Ever since Darwin proposed the process of natural selection as the causal mechanism of biological evolution in 1859, the theory has been enriched by contributions coming from different branches of biology. In this way, evolutionary ideas have influenced a wide spectrum of disciplines and research areas related to production, health and culture; and, especially, in the image that we, humans, have about ourselves. Nevertheless, the development of the Theory of Evolution has not been linear, since the original darwinism has experienced severe crisis in the last 150 years. The aim of this work is to review the historical process of the constitution of this theoretical framework, its main hypothesis, the impact of evolutionary thinking and ongoing debates. Finally, the relevance of

Alicia Massarini (✉)
Maestría en Política y Gestión de la Ciencia y la Tecnología, FFyB – UBA, Junín 956 (1113) , Buenos Aires, Argentina

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (Conicet)

amassarini@ffyb.uba.ar

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 265 - 295, © 2010 UNESCO-Montevideo.

evolutionary thinking and the implications in the research on the origin of life and the discovery of life in far cosmic scenarios is considered.

1. La vida en la Tierra: unidad y diversidad

Una bacteria, una ameba, un roble, un hongo de sombrero rojo, una ballena azul… aparentemente tan diferentes y sin embargo protagonistas y resultados de una misma trama: la historia de la vida en la Tierra. A pesar de sus notables diferencias, comparten características básicas muy significativas. Unidad en la diversidad es lo que los biólogos contemporáneos advierten cuando escrutan el mundo biológico. Todos los seres vivos actuales están constituidos por los mismos elementos (Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre, Fósforo), los que, al mismo tiempo, son los átomos más abundantes en el Universo. A su vez, estos elementos son los que componen las moléculas orgánicas, materiales constitutivos característicos de la vida. Desde los seres más pequeños -de tamaños microscópicos- hasta los de mayor tamaño -que pueden medir varios metros-, están constituidos por una o más células, mínima unidad estructural y funcional de la vida. Todos perpetúan sus características a través del tiempo y de las generaciones, empleando un código químico compartido, basado en los mismos ácidos nucleicos (ADN y/o ARN) e idénticos patrones de herencia. Estas profundas homologías sugieren que todas las formas de vida actual y sus antepasados actualmente extintos, comparten estos rasgos tan íntimos, debido a que estas características ya estaban presentes en un antepasado común, un ancestro único del que provienen todas las formas de vida conocidas.

Se estima que actualmente existen alrededor de 10 millones de especies de organismos, que son el resultado de la reproducción tenaz de otros seres, desde que la vida se originó en la Tierra, hace alrededor de 3800 millones de años, hasta el presente. Es poco conocido el hecho de que la ciencia ha descripto apenas un 20% de las especies que viven actualmente en nuestro Planeta, de modo que la mayor parte de la biodiversidad no ha sido aun descripta ni estudiada. Pero aun más sorprendente es la estimación de los paleontólogos, que consideran que las especies actuales representan menos del 1% del conjunto de las especies que han vivido en la Tierra a lo largo de su historia. De modo que si se la considera en toda la amplitud de su distribución espacial y temporal, la diversidad biológica es mucho mayor de lo que podemos imaginar.

Al mismo tiempo, los rangos de tolerancia de los seres vivos y por tanto, la variedad de los ambientes compatibles con la vida, se va ampliando constantemente, a medida que se exploran nuevos ambientes extremos y se describen las formas de vida que habitan en ellos: organismos que resisten altísimas temperaturas, que viven en condiciones extremas de presión, de salinidad, de pH, e incluso en subsuelos rocosos, a varios kilómetros de profundidad. De modo que la definición de vida, la magnitud de su diversidad y sus posibles escenarios, van ampliando sus alcances y no cesan de sorprendernos.

2. Acerca de los orígenes

Reseñaremos a continuación, los principales episodios vinculados con el origen de la vida. Para establecer un punto de partida, remontaremos el origen de esta historia al origen de la Tierra.

Se estima que nuestro Planeta se formó hace unos 4600 millones de años. Después de un proceso de evolución química, en el que los átomos fueron combinándose, se habrían formado moléculas más y más complejas, capaces de acumularse en ciertos subambientes en los que las condiciones fueran propicias para un balance positivo entre la tasa de síntesis y la de degradación. Es probable que a medida que aumentaban su concentración, esas moléculas comenzaran a asociarse formando sistemas, relativamente separados del medio en el que se encontraban, que al mismo tiempo resultaban capaces de intercambiar sustancias con su entorno. También es posible que algunas de esas pequeñas gotas adquirieran propiedades complejas tales como la capacidad crecer, reaccionar a estímulos químicos o físicos, intercambiar materia y energía con el medio y al llegar a cierto tamaño, quizás fueran capaces de dividirse...

¿Se trata de los primeros seres vivos? ...La respuesta es negativa. Estos sistemas no estarán vivos hasta que no sean capaces de reproducirse. Si al dividirse el sistema original, los sistemas resultantes no conservan -al menos en parte- las características y propiedades de aquél del cual provienen, no es posible hablar de reproducción. Mientras esas gotas de materia organizada no sean capaces de producir descendientes similares a sí mismas, no habrá continuidad, no habrá evolución y por tanto no habrá historia. Cada sistema será el producto de una penosa aventura individual, un evento único. Cada nacimiento será un recomenzar sin memoria, un acontecimiento sin futuro (Jacob, 1987).

Por el contrario, si algunos de esos individuos adquieren la capacidad de reproducirse, aunque lo hagan de un modo imperfecto y poco eficiente, se convertirán en los pioneros de esta historia. Los sistemas con esta capacidad serán el inicio de algo nuevo: los primeros seres vivos, persistentes ante las imprevistas catástrofes del ambiente porque sus "poblaciones" contienen variabilidad, de modo que aquellos más aptos para desenvolverse en el entorno y llegar a reproducirse con mayor eficiencia, serán capaces de perpetuarse a través de sus descendientes.

Las claves de este éxito son la variabilidad y la herencia, un tipo de información que puede ser transmitida a los descendientes, un programa capaz de organizar y preservar las características del sistema. En la historia protagonizada por los organismos, la reproducción fiel a través de la herencia constituye una condición necesaria. Sin embargo, el curso de la evolución biológica pone en evidencia que esta condición no es suficiente para que ocurra evolución, ya que hay un doble significado en el programa contenido en la herencia: reproducción fiel pero también presencia de variabilidad, sin la que no sería posible el cambio a través del tiempo. Estas dos cualidades que son inherentes a la vida, están dadas por la información genética que se transmite y se expresa de generación en generación, pero también por sus "errores". Debido a estas características, los mismos elementos que llevarían a un sistema inerte al desorden, funcionan en los organismos como fuente de estabilidad y diversidad.

La fidelidad en la reproducción es la garantía de continuidad. Pero sin variabilidad no habría novedad, no habría evolución. Si ocasionalmente aparecen variaciones en el programa genético capaces de mejorar la capacidad de sobrevivir y reproducirse, aquellos individuos que posean estas variantes, prosperarán y las características beneficiosas estarán cada vez más representadas en las futuras generaciones. Fidelidad con sorpresas, son las principales capacidades del programa genético que respaldan una historia persistente y siempre cambiante. Esta historia —cuyo recorrido puede ser explorado empleando los modelos, metodologías y marcos conceptuales la biología evolutiva—, puede ilustrarse como un árbol cuyo tronco representa el ancestro común, del que derivan múltiples ramas, algunas de las cuales prosperan y se bifurcan, mientras otras —que representan a los linajes extintos—, se truncan.

Esta visión genealógica del mundo biológico que actualmente resulta tan evidente, es relativamente reciente. En la cultura occidental, durante muchos siglos prevalecieron las ideas creacionistas y fijistas que concebían a la diversidad biológica como el resultado de uno o más episodios de creación sobre-

natural, luego de los cuales las especies se mantendrían invariantes a lo largo del tiempo. La idea de que las especies se originaron unas a partir de otras durante largos procesos de cambio, fue esbozada originalmente por Lamarck recién a principios del siglo XIX y terminó de instalarse a medida que las ideas de Darwin ganaban consenso durante la segunda mitad el siglo XIX.

3. Un poco de historia

A mediados del siglo XVIII el naturalista sueco Carl von Linné (1707-1778) describió una gran cantidad de especies e introdujo un sistema jerárquico para clasificarlas y nombrarlas. Linné consideraba que las especies habían sido creadas por Dios y buscaba "descubrir" el orden impreso en ese acto sobrenatural. Pese a su inspiración creacionista, su sistema aun persiste y las especies que describió y nombró en gran parte conservan su identidad, ya que para construir su sistema taxonómico consideró rasgos biológicos significativos para la evolución y la delimitación de las especies, tales como las diferencias en las estructuras reproductivas de las plantas. Por su parte, hacia finales del siglo XVIII, el naturalista francés George Cuvier (1769-1832) profundizó el estudio del mundo biológico, incorporando nuevos estudios sobre fósiles que consolidaron el campo de la paleontología y de la anatomía comparada. Los trabajos de Cuvier tuvieron gran importancia para la delimitación del objeto de estudio de la biología, ya que, a diferencia de los estudios taxonómicos previos que se centraban en las diferencias de la estructura visible, sus observaciones y propuestas teóricas apuntaban al análisis comparativo de la anatomía interna y de las estructuras y funciones que son comunes a diferentes tipos de organismos. A pesar de que tanto Linné como Cuvier asumieron una postura creacionista, sus contribuciones fueron muy significativas para la comprensión del mundo biológico, que se profundizará y experimentará un importante salto a principios del siglo XIX.

Durante este período, los organismos comenzaron a ser considerados desde una perspectiva más amplia e integradora. Ya no se concebían sólo como máquinas que funcionan por su forma y movimiento —a la manera de la física mecánica—, sino que la mirada del mundo biológico incorporó la comprensión de fenómenos más complejos y variados, tales como las transformaciones químicas que ocurren en la digestión o los fenómenos eléctricos presentes en la contracción muscular. La atención antes limitada a la estructura aparente, se amplió para abarcar los procesos fisiológicos que permiten

considerar al organismo como un todo y establecer las relaciones existentes entre estructuras y funciones, entre lo externo y lo interno, entre lo visible y lo invisible.

A su vez, todos estos conocimientos constituyeron la base para reconocer las características distintivas de la vida, que permiten diferenciarla de la materia inerte. Esta delimitación de la vida, será el principio fundante de la biología como ciencia a principios del siglo XIX. El siguiente cambio significativo en la comprensión de la complejidad y la diversidad biológica fue la incorporación de la idea de que la vida tiene una historia y de que los organismos son lo que son, como consecuencia de esa historia, es decir la introducción del eje temporal en el análisis de los sistemas biológicos. Para ello era indispensable incorporar la idea de cambio a través del tiempo.

Fue el naturalista francés Jean Baptiste Lamarck (1744-1829) el primero en considerar que los organismos se transforman a través del tiempo. Lamarck propuso que las especies se originan a partir de otras previamente existentes, mediante mecanismos y procesos naturales que pueden ser estudiados. En su obra Filosofía Zoológica (1809), expone detalladamente este proceso.

Según su concepción, en respuesta a los requerimientos del ambiente e impulsados por un "sentimiento interior", los organismos se ven obligados a utilizar determinados órganos con mayor o menor intensidad. En relación con su intensa utilización o con su desuso, estos órganos tenderían a desarrollarse, atrofiarse o perderse. Es así como las especies pueden transformarse incorporando o perdiendo ciertas características, ya que los rasgos adquiridos por los individuos podrían ser heredados por su descendencia. Este proceso hace que se acumulen cambios de generación en generación, que explican la adaptación de las especies a su entorno y el surgimiento de nuevas especies. Se trata de la primera teoría explicativa del origen y la transformación de las especies por procesos naturales. Un aspecto significativo de la Teoría de Lamarck es su concepción materialista del problema del origen de la vida. En sus palabras:

"*La eclosión de lo vivo a partir de lo inanimado representa un proceso de desarrollo progresivo de la materia... Entre los cuerpos orgánicos debieron aparecer formaciones semilíquidas extraordinariamente diminutas de consistencia muy fluida, posteriormente estos pequeños cuerpos semilíquidos se convertirían en formaciones celulares, provistas de receptáculos con fluidos en su interior, adquiriendo de esta manera los primeros rasgos de organización". (Lamarck, 1809)*

Así, los organismos más sencillos se habrían originado primariamente mediante un proceso de organización de la materia inorgánica, mientras que

el proceso de transformación de las especies habría producido gradualmente a los organismos más complejos, incluido el hombre. En la visión de Lamarck, la transformación de la vida puede compararse con una escalera mecánica, en la que los escalones ascienden constantemente a niveles superiores al mismo tiempo que en la base y en los peldaños inferiores, la generación espontánea repone nuevos organismos, que son la materia prima para el cambio. Por un conjunto de objeciones intrínsecas a la teoría –principalmente la fragilidad del argumento referido al "sentimiento interior"— y en muy buena parte debido a las condiciones históricas —políticas, religiosas— en que fue recibido, el pensamiento de Lamarck no logró consenso, fue fuertemente criticado y descalificado, y su teoría quedó en la sombra (Gould, 1985).

4. Darwin, una propuesta superadora

Pasaron cincuenta años, hasta que el naturalista inglés Charles Darwin (1809-1882) expuso, en su libro "El origen de las especies por medio de la selección natural" (1859), una teoría convincente para explicar cómo se ha producido el cambio evolutivo.

Los primeros intentos de Darwin por imaginarse el proceso de transformación de los seres vivos, se enmarcaron en la teoría de su predecesor, J.B. Lamarck. Sin embargo, -según su propio relato- pronto desechó este modelo al comprobar que la evolución no parecía ser un proceso lineal de cambio ascendente. La primera imagen significativa que sintetiza la idea de evolución propuesta por Darwin, es un árbol que se ramifica en forma irregular, representado en el margen de uno de sus cuadernos de notas para ilustrar su idea. A decir del propio Darwin:

"*Así como los brotes, por crecimiento, dan origen a nuevos brotes, y éstos, si son vigorosos, se ramifican y sobrepujan por todos lados a muchas ramas más débiles, así también, a mi parecer, ha ocurrido mediante generación, en el gran árbol de la vida, que con sus ramas muertas y rotas llena la corteza de la tierra, cuya superficie cubre con sus hermosas ramificaciones, siempre en nueva división". (Darwin, 1859)*

Esta primera imagen, que constituye una representación muy rica de la historia de la vida –un ancestro común y una posterior diversificación, con linajes que coexisten—, no resolvía, sin embargo, cuál era el mecanismo responsable de la transformación y la diversificación. En la búsqueda de una respuesta a este interrogante, numerosas fuentes confluyeron en el pensamiento

de Darwin: las observaciones realizadas en el viaje a bordo del Beagle, el estudio de las colecciones naturales que obtuvo durante el recorrido, la experiencia de selección artificial de los criadores de animales domésticos y algunas propuestas provenientes de otras ramas de la ciencia, tales como el concepto demográfico de Malthus de "lucha por la existencia" o el uniformismo geológico propuesto por Charles Lyell.

En la búsqueda de nuevas explicaciones fue muy significativa la incorporación de la idea de que la antigüedad de la Tierra era mucho mayor que la hasta entonces asignada, conforme a la interpretación literal de los escritos bíblicos. En relación con ello, y tomando las ideas del geólogo Charles Lyell, Darwin asumió que en curso de su larga historia la Tierra ha experimentado un proceso de transformación permanente, lo cual significa que la vida también debió cambiar para subsistir. Se trataba entonces de encontrar un mecanismo natural capaz de explicar esas transformaciones. Poco tiempo después, cuando sólo tenía treinta años, Darwin había hallado una explicación convincente para interpretar los cambios de las especies en la naturaleza: la variación y la competencia ciega, sin ningún designio, fuerza sobrenatural ni plan preconcebido, serían capaces de explicar la diversidad y la adaptación de las especies. En su obra, "El origen de las especies", publicada 20 años después, Darwin expresó así su argumento:

"Como de cada especie nacen muchos más individuos de los que pueden sobrevivir, y como, en consecuencia hay una lucha por la vida, que se repite frecuentemente, se sigue que todo ser, si varía, por débilmente que sea, de algún modo provechoso para él, bajo las complejas y a veces variables condiciones de vida, tendrá mayor probabilidad de sobrevivir y de ser así naturalmente seleccionado. Esta conservación de las diferencias y variaciones favorables de los individuos y la destrucción de las que son perjudiciales es lo que yo he llamado selección natural". (Darwin, 1859)

La explicación de Darwin es extremadamente simple y al mismo tiempo muy poderosa. Debido al proceso de selección natural, una parte de los individuos de la población mueren sin dejar descendencia, mientras que aquellos organismos que presenten las características más favorecidas por el ambiente, tendrán una mayor probabilidad de reproducirse. Los individuos portadores de las características más ventajosas dejarán mayor descendencia y por lo tanto, sus rasgos heredables estarán proporcionalmente más representados en la siguiente generación. De este modo, las especies se van modificando a través del tiempo y a lo largo de las generaciones, la población como un todo se irá

transformando ya que aumentarán las variantes hereditarias más favorables e irán desapareciendo las desventajosas.

A partir de la formulación de la teoría de Darwin, el pensamiento biológico sufrió un importante vuelco: se había incorporado definitivamente la idea del proceso evolutivo y se disponía de un proceso coherente para interpretar ese cambio: la selección natural. Sin embargo, los mecanismos de la herencia permanecieron sin ser comprendidos por medio siglo más.

5. Lo que Darwin no pudo resolver

A partir de sus observaciones, Darwin podía afirmar que ciertos rasgos se transmitían de padres a hijos. Sin embargo desconocía los mecanismos por los cuales se heredaban esas características. En el capítulo V de "El origen de las especies", titulado "Leyes de la variación", Darwin describe una gran cantidad de posibles causas que explican el origen y la herencia de las variaciones, la mayoría de las cuales resultan desacertadas a la luz de los conocimientos actuales. Entre esos mecanismos Darwin incluye "los efectos en los cambios de condiciones", "los efectos del uso y el desuso de los órganos", que incluye la idea de herencia de los caracteres adquiridos, la "aclimatación", "la variación correlativa", entre otros. Al mismo tiempo, en esa época y, prácticamente hasta fines del siglo XIX, se consideraba que los descendientes eran el resultado de la mezcla de las características de ambos padres y que la portadora de la herencia era la sangre. Lo paradójico de esta concepción es que si el mecanismo de la herencia mezcladora fuera acertado, sería imposible demostrar la eficacia de la selección natural, ya que cualquier característica favorable, a través de las sucesivas generaciones, se iría diluyendo hasta perderse. Sobre esta base, F. Jenkin, un ingeniero escocés de la época, atacó duramente el mecanismo de la selección natural y puso en duda el conjunto de la interpretación darwinista (Bulmer, 2004).

Darwin advertía estas contradicciones y comprendía que existían limitaciones que no le permitían refutar la crítica de Jenkin. En el resumen del capítulo V de "El origen de las especies" manifestaba su preocupación por el desconocimiento de los patrones de herencia:

"*Nuestra ignorancia sobre las leyes de la variación es profunda. Ni en un sólo caso entre cientos podemos pretender señalar una razón por la que esta o aquella parte ha variado" (Darwin, 1859).*

Resultaba evidente que debía existir algún mecanismo que repusiera la variabilidad genética, dado que ésta es la materia prima sobre la que opera la selección natural. Sin embargo, como aún no se conocía como podían generarse las nuevas variantes genéticas, Darwin recurrió a la hipótesis de la herencia de los caracteres adquiridos.

Recién en los años 1880, el biólogo alemán A. Weismann (1834-1914) puso a prueba experimentalmente la hipótesis de la herencia de los caracteres adquiridos y a partir de los resultados de sus experimentos comprendió, que había una suerte de "inmortalidad" de las características genéticas que van pasando inalteradas de padres a hijos. Sugirió entonces la existencia de un "plasma germinal" que sería independiente del cuerpo de los organismos, al que denominó "plasma somático". El plasma germinal sería capaz de pasar de generación en generación, pero cualquier modificación que sufriera, no sería transmitida a los descendientes, de modo que los cambios en el cuerpo no pueden transferirse a las células germinales y por lo tanto, no pasarían a la siguiente generación.

Paradójicamente, en 1865, es decir pocos años después que Darwin diera a conocer sus ideas, G. Mendel (1822-1884), un monje suizo que realizaba cruzamientos experimentales en diferentes especies vegetales, describió acertadamente los patrones de la herencia, conocimientos que hubieran podido evitarle a Darwin más de un dolor de cabeza. El principal aporte de Mendel consistió en demostrar que el material hereditario no está conformado por una sustancia que se mezcla en los descendientes sino que está compuesto por factores o partículas hereditarias, a los que actualmente llamamos genes, que conservan su integridad a lo largo de las generaciones, de manera que la variabilidad genética no disminuye. Sin embargo, la mayoría de sus contemporáneos no conocieron sus resultados, hasta que en 1900 otros investigadores reinterpretaron sus experimentos y dieron a conocer las llamadas leyes de la herencia. Este hecho marcó el comienzo de la genética como ciencia. La crítica de F. Jenkin al darwinismo se desmoronaba. Sin embargo, aún faltaba responder un importante interrogante: el mendelismo explica cómo se heredan las características de los organismos, pero nada dice acerca del origen de variantes genéticas nuevas.

6. Primeros escollos: ¿Darwinismo o mutacionismo?

Hacia 1903 el botánico holandés H. de Vries (1848-1935) observó que en las poblaciones naturales de plantas, aparecían ocasionalmente individuos raros que diferían del resto de los ejemplares de la población. Cuando cultivó estos individuos raros en forma experimental, observó que producían descendientes iguales a sí mismos. Estos hallazgos lo llevaron a pensar que los genes podían sufrir alteraciones súbitas e independientes del medio ambiente, a las que llamó mutaciones, que podían ser transmitidas a las siguientes generaciones. Las mutaciones revelaban ser el mecanismo por el cual, a partir de errores azarosos que ocurren en el material genético, surgen nuevas variantes heredables. Ello podía explicar el origen de la variabilidad que constituye el sustrato de la selección natural.

Sin embargo, el efecto de las mutaciones no fue interpretado a la luz del darwinismo. Los primeros genetistas propusieron que las mutaciones producirían efectos tan drásticos en los organismos, que podrían conducir incluso a originar nuevas especies. En otras palabras, las mutaciones no fueron consideradas como materia prima de la selección natural, sino que, en cambio, fueron concebidas como el factor causal, el mecanismo capaz de explicar por sí mismo la evolución de las especies. Esta escuela, a la que se denominó mutacionismo, aportó los elementos que permitieron explicar el origen de las variantes genéticas nuevas, superando finalmente a la concepción de la herencia de los caracteres adquiridos. Sin embargo, estas conclusiones no se integraron al marco teórico del darwinismo y, por unos 30 años, la teoría mutacionista representó una hipótesis alternativa para explicar la evolución biológica.

Durante este mismo período, otros científicos se interesaron por conocer la localización física de los genes. En esta búsqueda, gracias al perfeccionamiento de los microscopios, les fue posible observar en el interior de los núcleos celulares, “estructuras en forma de bastones” que, como se coloreaban diferencialmente, fueron llamadas cromosomas. Al mismo tiempo observaron que el comportamiento de los cromosomas durante la formación de las células sexuales se corresponde con el comportamiento de los genes inferido por Mendel. Esto hizo que a partir de observaciones independientes, en 1902, el norteamericano W. Sutton y el alemán T. Boveri propusieran que los genes están localizados en los cromosomas, sentando las bases de la teoría cromosómica de la herencia, que permitió complementar los principios mendelianos. Sin embargo, como la corriente dominante en el pensamiento evolutivo de principios de siglo era la teoría mutacionista, la teoría cromosómica de la he-

rencia, al igual que el mendelismo, tampoco se integró al cuerpo teórico del evolucionismo darwinista.

7. La recuperación del concepto de variabilidad en el contexto poblacional

Los primeros genetistas proponían que en las poblaciones naturales existe para cada gen, un “tipo normal o salvaje”. Pensaban que esta variante estaba presente en la mayoría de los individuos de la población y que, de vez en cuando, surgía alguna nueva mutación. Para cada ambiente dado habría un individuo “ideal” y si aparecía un mutante más ventajoso, éste terminaría por sustituir al antiguo tipo salvaje. Estos primeros genetistas trabajaban con pequeñas muestras de organismos, integradas por unas pocas decenas de individuos, de modo que los mutantes surgían muy ocasionalmente. Debido a ello, las mutaciones eran consideradas una “rareza de la naturaleza”. Extrapolando estas observaciones a las poblaciones naturales, se las concebía como conjuntos prácticamente homogéneos en los que la evolución consistía en el reemplazo del tipo salvaje por un mutante exitoso que, eventualmente, con el tiempo se convertiría en el nuevo tipo normal.

Hacia los años ´30 y ´40 del siglo XX, nuevas generaciones de genetistas comenzaron a llevar adelante las primeras expediciones de campo en búsqueda del estudio de los organismos en sus condiciones naturales. Trabajando con grandes cantidades de individuos (miles o cientos de miles, generalmente moscas del género *Drosophila*), propusieron que en las poblaciones naturales no existe un tipo salvaje y formas mutantes sino que son muy heterogéneas y los individuos son genéticamente muy variables entre si. Así, no existiría un tipo ideal sino un conjunto de variantes genéticas que, en promedio, garantizan una satisfactoria sobrevivencia de los individuos a múltiples ambientes con condiciones diversas.

Sobre la base de estas ideas, surgió una nueva disciplina, la genética de poblaciones, que recuperó y resignificó el concepto de población. A diferencia de las posturas anteriores, el énfasis no estaba ahora puesto en los organismos individuales sino en los sistemas integrados de organismos: las poblaciones. Desde este punto de vista sistémico, se destacaba la existencia de un nivel de organización de rango superior al organísmico y más aún, en lugar de considerar la población de individuos, la atención se concentraba sobre la población de genes. Son los genes los que, generación tras generación, se distribuyen

temporariamente entre los organismos individuales, partícipes transitorios y efímeros del proceso evolutivo. En conclusión, conforme a esta visión, lo que en realidad caracteriza a una población es su reservorio o conjunto de genes (Suzuki et al., 1989).

8. La cristalización de la Teoría Sintética de la Evolución

El trabajo de los genetistas de poblaciones hacía indispensable un desarrollo matemático mucho más complejo que el de la genética mendeliana clásica, pues ahora se trabajaba con conjuntos de genes y no con individuos aislados. El análisis de la dinámica de las frecuencias de las diferentes variantes en el seno de las poblaciones naturales, tanto a través del tiempo como del espacio, requirió un tratamiento estadístico que hasta el momento no se había empleado. Ya en 1908, el físico Hardy y el matemático Weinberg habían llevado a cabo deducciones matemáticas que permitieron extender las predicciones de la genética mendeliana al ámbito poblacional. En las dos décadas siguientes, autores como Haldane, Fisher y Sewall Wright aportaron el tratamiento estadístico para que la genética mendeliana y la teoría darwinista pudieran integrarse en una síntesis que se conoció como la síntesis evolutiva o neodarwinismo.

La Teoría Sintética de la Evolución (TES) representó un hito en el pensamiento evolutivo contemporáneo. Hacia los años ´50 del siglo XX, el neodarwinismo se consolidó como un cuerpo teórico compacto, enriquecido por los conceptos más modernos de la biología. Diversos aportes provinieron de los campos de la anatomía comparada, la embriología, la sistemática, la paleontología, la genética, sumando importantes cuerpos de evidencias que permitieron consolidar los postulados darwinistas. Los principales representantes de la síntesis fueron el genetista T. Dobzhansky y el zoólogo E. Mayr, para quienes el núcleo central de sus argumentos era el tema de la adaptación. Toda la variabilidad biológica fue interpretada a la luz de este concepto: la variantes genéticas que existen en la naturaleza están allí porque son más ventajosas en términos selectivos; surgieron por azar debido a mutaciones ocurridas en el material genético pero persistieron y se hicieron frecuentes gracias a la selección natural. Así, todas las estructuras y funciones presentes en los seres vivos fueron interpretadas como el resultado de un lento proceso de cambio pilotea-

do por la selección natural. Más aún, el origen de nuevas especies, también fue concebido como un resultado de este mismo proceso.

9. Los alcances e impactos de la Teoría Evolutiva

Actualmente, la mayor parte de los biólogos coinciden en afirmar que Teoría Evolutiva es el principal cuerpo teórico de la Biología contemporánea. Más allá de sus especializaciones, las diferentes ramas de la biología pueden articularse en torno al eje evolutivo, que permite descifrar, reconstruir y articular la "lógica de lo viviente", tanto en cuanto a la diversidad espacial y temporal de la vida, como a la comprensión de sus diferentes niveles de organización, sus procesos y patrones distintivos. Por ello, el marco explicativo que proporciona la Teoría Evolutiva ha permitido profundizar significativamente el conocimiento del mundo biológico y superar enfoques descriptivos y fragmentarios. Pero al mismo tiempo, la biología evolutiva tiene importantes consecuencias a la hora de comprender procesos y problemas complejos, de gran significación humana, que trascienden lo biológico y se sitúan en campos relevantes tales como la salud, la problemática ambiental o la producción de alimentos.

9.1. El valor heurístico de la Teoría Evolutiva para la comprensión del mundo biológico

En cuanto a nuestro conocimiento de la vida, la Teoría Evolutiva ha permitido establecer con un alto grado de confiabilidad que, tal como lo anticipó Darwin, todos los organismos conocidos han evolucionado a partir de un antecesor común que existió hace aproximadamente 3800 millones de años. Asimismo, esta teoría ha constituido el marco inspirador de numerosas líneas de investigación sobre el origen primario de la vida, que desde 1924 —partiendo del modelo pionero propuesto por A. I. Oparin—, han contribuido a desentrañar diversos aspectos de este proceso. Al mismo tiempo, la sistemática evolutiva, ha desarrollado diversos métodos para la reconstrucción filogenética de la historia de la vida, que han permitido establecer hipótesis acerca de las relaciones de parentesco entre especies vivientes y entre éstas y sus antepasados fósiles, contribuyendo a la construcción de una interpretación más robusta de los patrones de diversificación y extinción de los seres vivos. En este contexto, es especialmente significativa la posibilidad que ha dado el enfoque evolutivo

contemporáneo para explorar la historia del linaje al que pertenecemos en el frondoso árbol de la vida, resignificando el lugar de nuestra especie en la naturaleza.

Este problema se estudia en un amplio marco de interpretación que asume que los seres vivos —y nuestra especie como una más de ese universo—, deben sus características a una combinación de azar y necesidad, es decir a la interacción entre procesos determinísticos y sucesos aleatorios (Monod, 1981). Esta visión involucra la ruptura con el generalizado supuesto narcisista y antropocéntrico que concibe a nuestra especie como el resultado inevitable de un proceso direccional en el que el Homo sapiens sería la expresión más elevada de complejidad y perfección.

9.2. El impacto de la biología evolutiva en el campo ambiental, la salud y la producción agropecuaria

Los modelos y marcos conceptuales de la biología evolutiva son fundamentales en la interpretación, el desarrollo y la implementación de investigaciones, proyectos y programas vinculados con la problemática de la actual crisis ambiental y la preservación de la biodiversidad. Por ejemplo, la información filogenética y la biogeografía evolutiva son necesarias para identificar las zonas de mayor biodiversidad, así como aquellas regiones vulnerables que albergan especies locales únicas. Por su parte, los modelos de la genética de poblaciones permiten caracterizar los patrones de variabilidad de especies y poblaciones en peligro de extinción, estimar tamaño mínimo para evitar depresión por consanguineidad y detectar el tráfico de especies amenazadas mediante el uso de marcadores genéticos específicos.

En el ámbito de la agricultura y la ganadería, el diseño de criterios y técnicas para el mejoramiento del patrimonio genético vegetal y animal se sustenta actualmente en el conocimiento de la variabilidad genética y su comportamiento en las poblaciones a través del tiempo, considerando sus patrones de heredabilidad y plasticidad ambiental. A su vez, la comprensión de la dinámica de patógenos y plagas en los cultivos y el desarrollo de modelos para el control biológico, se apoya en los modelos de coevolución. En este mismo campo, el desarrollo de estrategias y criterios para el uso de agroquímicos en el control de plagas y malezas, se basa en el conocimiento de los procesos de selección y en la dinámica del aumento de la frecuencia de la resistencia al tóxico en la población que se desea controlar.

El marco interpretativo de la evolución es también central en el campo de la comprensión de los procesos de salud y enfermedad en los humanos. Por un lado, los modelos de la genética de poblaciones son la herramienta empleada para estimar las frecuencias de los genes asociados a enfermedades hereditarias monogénicas en poblaciones humanas —tales como hemofilia, fibrosis quística, o fenilcetonuria— lo que permite estimar los riesgos de padecerlas. Ello es indispensable tanto para el diseño de políticas públicas, como para el asesoramiento genético individual a partir del análisis de genealogías específicas. Por otra parte, la sistemática y la biogeografía evolutiva sustentan la identificación y el reconocimiento del área de distribución de las especies que son causantes, trasmisoras o reservorios de enfermedades humanas, tales como mal de Chagas, paludismo, malaria, fiebre amarilla o dengue. En estos casos, la biología evolutiva, no sólo contribuye a la caracterización de los patógenos de origen biológico, sino que es central para la medicina epidemiológica, a la hora de diseñar estrategias para el tratamiento de las enfermedades asociadas a estos agentes. Asimismo, tanto en el tratamiento de enfermedades infecciosas causadas por bacterias, virus, hongos, o parásitos de origen animal, como en el tratamiento del SIDA o del cáncer; la medicina emplea estrategias que deben considerar la dinámica de las poblaciones del agente patógeno o de la población celular que se desea controlar o erradicar. Por ello, tanto las políticas públicas en salud a nivel poblacional, como el diseño de tratamientos específicos, deberán tomar en consideración el inevitable aumento de la frecuencia de las variantes resistentes, particularmente cuando se emplea un único fármaco. Así, el estudio de la dinámica de la adaptación de los patógenos frente al uso de drogas u otras estrategias terapéuticas (uso de antibióticos, antiparasitarios, drogas oncológicas) es un aspecto central para el desarrollo de nuevas terapias. Un ejemplo de ello, es el éxito en las terapias para el SIDA basadas en el empleo de "cócteles" que incluyen varias drogas, lo que evita la proliferación de las cepas resistentes. En cuanto a esta misma patología, ha resultado de gran valor para su comprensión, el diseño de modelos evolutivos basados en el conocimiento de los procesos de convolución, que permiten estudiar el desarrollo de la virulencia en la relación huésped/patógeno, así como el empleo de técnicas filogenéticas que contribuyen a la reconstrucción de las rutas de dispersión del virus y a explorar su origen. Finalmente, desde una mirada alternativa al reduccionismo hegemónico de la medicina occidental, un nuevo enfoque en la comprensión de los procesos de salud y enfermedad se plasma en una disciplina llamada medicina darwiniana. Esta corriente propone que muchas de las patologías humanas más frecuentes

en la actualidad son el resultado de un desacoplamiento entre el lento ritmo de la evolución biológica y la enorme velocidad de los cambios culturales y ambientales en la evolución de los humanos. Así, enfermedades metabólicas como la hipertensión, la obesidad, la diabetes o ciertas patologías óseas tales como las afecciones más frecuentes de la columna, deben ser entendidas como resultado de cambios muy recientes y rápidos en los hábitos de alimentación y de actividad de los humanos actuales, los cuales se apoyan en una biología de la especie que evolucionó largamente en otro entorno y que no resulta adecuada para estos cambios. Del mismo modo, ciertas respuestas fisiológicas tales como los vómitos, la diarrea, la fiebre o las náuseas durante el embarazo —actualmente considerados como síntomas, patologías o molestias que deben tratarse— podrían ser interpretados en un contexto evolutivo como adaptaciones defensivas frente a ciertos riesgos que enfrenta el organismo.

10. Polémicas contemporáneas

El marco de interpretación aportado por la TES ha contribuido a comprender el mundo biológico, a articular las diferentes ramas de la biología y a enfrentar problemas prácticos en diversos campos. Asimismo, ha sido el marco de interesantes críticas y debates teóricos. Uno de los aspectos polémicos más relevantes puede sintetizarse en la siguiente pregunta: ¿puede el proceso de selección natural dar cuenta de todo el cambio evolutivo? Al respecto, el propio Darwin mostraba su cautela al considerar al alcance explicativo del proceso selectivo, cuando en el prólogo de “El origen de las especies” afirmaba:

“...estoy convencido de que la selección natural ha sido el medio más importante de modificación, si bien no el único” (Darwin, 1859).

Sin embargo, los genetistas de poblaciones que en la década de 1940 contribuyeron a consolidar la Teoría Sintética, endurecieron su postura alrededor de este argumento. En el marco de la síntesis evolutiva, toda característica de un organismo era interpretada como una adaptación y por tanto, como el resultado del proceso de selección natural. En palabras de J. Huxley:

“Por lo que sabemos hasta ahora, la selección natural no sólo es inevitable, no sólo es un factor de evolución eficaz: es el único factor de evolución eficaz”.

Esta fue la concepción dominante desde 1940 y hasta fines de 1950; pero en la década de 1960, esta postura, que luego fue denominada panseleccionismo, comenzó a recibir diferentes cuestionamientos.

10.1. El neutralismo y el tic-tac de la evolución

Como se mencionó previamente, los genetistas de poblaciones recuperaron la idea de que en las poblaciones naturales existía una amplia variabilidad, que interpretaron como una expresión de la adaptación a diferentes subambientes en los que operan presiones selectivas diversas. Sin embargo pronto surgieron nuevos interrogantes, ya que el empleo de técnicas bioquímicas y moleculares durante los años 60 del siglo XX, reveló que la variabilidad existente a nivel molecular era aun mucho mayor de lo que se conocía anteriormente. Esta nueva evidencia, hizo que algunos biólogos evolutivos se preguntaran: ¿cuál es el significado de toda esa variabilidad?, ¿las numerosas variantes presentes tendrán valores adaptativos diferenciales?, ¿su amplia representación podrá ser explicada como una consecuencia de la selección natural?

Frente a este desafío, algunos genetistas japoneses y norteamericanos propusieron que una buena parte de la variación existente a nivel molecular podría no estar afectando la aptitud de los organismos de modo que probablemente represente sólo un “ruido” neutro del sistema. Para estos genetistas, ello no implicaba negar el proceso de selección natural, ni la existencia de las adaptaciones como consecuencia de este proceso; sino que la propuesta subrayaba que la fuerza de la selección natural podría ser mucho más débil de lo que se creía hasta entonces, ya que una gran proporción de la variabilidad genética observada en la naturaleza no cumpliría función alguna. Según la postura de Motoo Kimura, biólogo japonés creador de esta escuela a la que se conoce como “neutralismo”, la mayoría de las variantes genéticas a nivel molecular no confieren ventaja ni desventaja al portador. Por ello, son capaces de “derivar” en las poblaciones sin ser advertidas por la selección natural, de modo que se pierden o se fijan azarosamente por el proceso de deriva genética (Kimura, 1965).

Una de las evidencias que sustentan la propuesta del neutralismo es lo que se ha llamado “el reloj molecular” (Zuckerkandl and Pauling, 1965). Si se analiza la estructura molecular de algunos compuestos complejos, por ejemplo la hemoglobina, se puede observar que en diferentes grupos de organismos esta molécula presenta cambios puntuales. Estas diferencias a nivel molecular entre grupos de organismos emparentados son atribuibles a las mutaciones génicas que se acumularon desde que los linajes se separaron. Si se analizan grandes grupos de organismos, por ejemplo diferentes grupos de vertebrados, se observa que existe una correlación entre el tiempo transcurrido desde la divergencia y la cantidad de cambios acumulados. Es decir, existe una tasa de

cambio relativamente constante. Esta correlación pone de manifiesto que las mutaciones se presentan y se van incorporando regularmente a las poblaciones y que la selección no las elimina ni las favorece porque la mayoría de ellas resultan neutras (Kimura, 1968).

La hipótesis del reloj molecular se sustenta en la idea de que existe una tasa de cambio constante a nivel molecular que permite averiguar el tiempo transcurrido desde la divergencia de dos grupos de organismos emparentados. Conociendo el valor de la tasa de cambio, si se obtienen datos moleculares que permitan conocer la cantidad de diferencias acumuladas entre los dos grupos, es posible calcular el tiempo de divergencia entre ambos. Así, el reloj molecular constituye una valiosa herramienta para el biólogo evolutivo y representa un valioso aporte para el campo de los estudios filogenéticos.

La discusión entre los partidarios del neutralismo y aquellos biólogos que interpretan toda la variabilidad como consecuencia del accionar de la selección natural —llamados panseleccionistas por quienes sustentan un enfoque alternativo— permanece abierta (Kreitman, 1996; Ohta, 1996).

10.2. La "crítica al programa adaptacionista"

Hacia finales de la década de 1970, Stephen. J. Gould, cuya especialidad es la paleontología y el genetista de poblaciones Richard Lewontin presentaron públicamente lo que se conoce como la "Crítica al programa adaptacionista" (Gould and Lewontin, 1979). Estos dos importantes biólogos norteamericanos plantearon por entonces una nueva manera de analizar las adaptaciones y de evaluar el papel de la selección natural.

Para presentar su postura, propusieron la siguiente analogía arquitectónica: si se observa la bóveda del techo de un edificio gótico, se pueden apreciar unas estructuras en forma de triángulos que se sitúan en la parte más alta, generalmente bellamente ornamentadas. Si se piensa en la función de esas estructuras triangulares, es posible suponer que fueron diseñadas especialmente, con el objeto de ser portadoras de las hermosas pinturas que las adornan. En realidad, —dice Gould— esas estructuras son el resultado inevitable de la yuxtaposición de dos arcos góticos: mientras que el arco tiene una función, las estructuras triangulares son sólo un emergente. Sólo cuando se conoce el proceso constructivo y las limitaciones del diseño arquitectónico, es posible reconocer a las estructuras triangulares como lo que son: inevitables consecuencias.

Apoyados en esta imagen, Gould y Lewontin se preguntan ¿Por qué insistimos en mirar toda característica de un organismo como si tuviera una función, un propósito? Entre las características de los seres vivos, algunas o muchas de ellas podrían ser emergentes o consecuencias de las restricciones que impone el desarrollo o la organización del organismo como un todo, de modo que las mismas no deberían ser interpretadas como adaptaciones.

La evolución del mentón humano es un buen ejemplo para ilustrar este problema. Esta estructura, tiene bastante desarrollo en los humanos, en tanto que ni los antropoides jóvenes ni los adultos tienen mentón. Todos los intentos por explicar el mentón del hombre como una adaptación específica fracasaron. Finalmente, analizando los patrones de desarrollo, se constató que hay dos zonas de crecimiento en la mandíbula inferior: la zona basal de la mandíbula y la zona alveolar, situada en la parte superior que es donde se localizan los dientes. En la línea evolutiva humana, ambas zonas se han ido haciendo más pequeñas respecto de sus ancestros, debido a una reducción en la tasa de crecimiento, pero es la zona alveolar la que más se ha reducido (Stark and Kummer, 1962). El mentón aparece como consecuencia de los diferentes ritmos relativos de crecimiento de las diferentes zonas de la mandíbula. Si se identifica este proceso, el mentón constituye más una representación mental que una unidad evolutiva. Conjuntamente con su reconocimiento como un emergente, desaparece el problema de su interpretación adaptativa.

Gould y Lewontin, en su crítica al programa adaptacionista, no niegan la existencia de la adaptación, pero amplían el interés a una mirada más plural, que permite considerar al organismo globalmente y recurrir a explicaciones alternativas a la selección natural para interpretar sus características. Entre estas alternativas se encuentra la de considerar que es probable que muchos cambios en la evolución se deban al azar. Un ejemplo de ello son las evidencias que presenta la escuela neutralista, que ponen de manifiesto que gran parte de las sustituciones de aminoácidos en la evolución resultó de la fijación al azar de mutaciones en poblaciones pequeñas. También señalan que el buen ajuste de un organismo a su ambiente no tiene siempre una base genética y por lo tanto no es siempre el resultado de un proceso de selección natural, tal es el caso de la forma de los corales y las esponjas, o el de la variación geográfica en el tamaño de algunos insectos en función de la temperatura ambiente.

Por otra parte, destacan la importancia de tener en cuenta el resultado de las interacciones entre genes. Así, algunos caracteres selectivamente neutrales o inclusive desventajosos podrían manifestarse sólo por estar genéticamente asociados a otros caracteres que tuvieran aparejada una ventaja selectiva. Asi-

mismo, los cambios en un gen pueden tener múltiples efectos en la fisiología o el desarrollo de un organismo. Esto se conoce como *efecto pleiotrópico*. La selección natural puede favorecer la presencia de un gen por alguno de los efectos que produce, pero otros efectos sólo serán arrastrados.

Por otra parte, observan que en la evolución, no todos los cambios son lentos, graduales y adaptativos. Algunos nuevos rasgos se producen como consecuencia de *alometrías*, es decir, del crecimiento diferencial de diferentes partes de un organismo, cuyo resultado es la modificación de las proporciones entre las mismas, dando lugar a nuevas formas, nuevos rasgos y emergentes arquitectónicos. Otros importantes cambios evolutivos son consecuencia de *procesos heterocrónicos*, es decir del cambio en las tasas de desarrollo, que pueden producir la aceleración, el retardamiento o la interrupción de dicho proceso. Un ejemplo de este tipo de procesos es la *neotenia*, que involucra la adquisición de la madurez sexual en un estadio inmaduro o juvenil. Como analizaremos más adelante, estos procesos estarían asociados al surgimiento de cambios rápidos con consecuencias drásticas, en contraste con los cambios graduales y adaptativos que resultan de una sucesión de mutaciones puntuales modeladas por procesos de selección natural.

10.3. Las limitaciones del cambio evolutivo

Otra de las críticas que se han planteado a la postura clásica es el cuestionamiento a la omnipotencia de la selección natural, es decir, ¿puede la selección natural, actuando en forma constante, perfeccionar crecientemente las características de las especies hasta llegar a producir adaptaciones óptimas? La respuesta de los críticos al programa adaptacionista, es un no rotundo. La selección natural no hace “lo que quiere” sino “lo que puede”. La materia prima no es una masa amorfa sino organismos reales, imperfectos y estructurados.

Aparecen entonces en escena los factores limitantes o “constraints” de la selección natural. Por un lado, intervienen aquellos condicionantes intrínsecos del organismo, tales como las limitaciones impuestas por la historia, los patrones de desarrollo y el diseño de cada grupo. Por otro lado, entran en juego los factores extrínsecos o ecológicos.

La observación en relación con las restricciones de la adaptación se presenta como una advertencia frente a la postura de los genetistas de poblaciones representativos de la TES, quienes presentan al proceso evolutivo como el cambio en las frecuencias génicas de una población a través del tiempo. Se ha

visto, sin embargo, que no todas las combinaciones son posibles. A propósito de este problema, Gould y Lewontin (1979) plantean que los organismos no se comportan como bolas de billar rodando libremente en un plano, impulsados, de aquí para allá por diferentes presiones selectivas. Por el contrario, dado que los organismos son sistemas integrados, y sólo unas pocas combinaciones son aptas, el cambio evolutivo se parecería más bien al movimiento de poliedros, que sólo pueden caer sobre alguna de sus caras. Una vez que un grupo se estabiliza sobre una cara, se establecería una cierta inercia, de modo que no sería fácil pasar a una nueva posición. La consecuencia de esta idea es que el cambio evolutivo más relevante, representado por el cambio de cara del poliedro, no sería gradual y permanente como el movimiento de las bolas, sino más bien discontinuo.

Si la selección natural, operando a través del cambio en las frecuencias génicas, fuera el único proceso capaz de explicar la diversidad de la vida, las posibilidades serían ilimitadas. Sin embargo estas posibilidades están rigurosamente acotadas por tres aspectos principales: la historia del organismo que se acumula en el programa genético, los patrones del desarrollo embrionario caracterizados por una secuencia de "bloques" integrados que no pueden ser desmontados pieza por pieza y la arquitectura del organismo, que impone una serie de restricciones estructurales. Según estos autores, el estudio y la comprensión de estos factores restrictivos, que hacen a la naturaleza de cada grupo de organismos, resulta de mayor relevancia que el estudio del proceso selectivo para comprender los grandes rumbos de la evolución.

En sus palabras: *" Si se analiza a los organismos como unidades integrales, tan constreñidas por la herencia filética, las pautas de desarrollo y la arquitectura general, las propias limitaciones cobran más interés e importancia en el trazado de las vías de cambio que la fuerza selectiva que pueda mediar en éste cuando se produzca"* (Gould, 1984).

Una idea equivocada acerca de la evolución presenta a la selección natural como un principio perfeccionador, tan libre de trabas en su accionar que los organismos acaban protagonizando un juego de ingeniería que conduce necesariamente a un diseño óptimo. Pero la prueba de que ha sido el proceso evolutivo —y no un agente racional sobrenatural— el que ha construido los organismos, son las limitaciones que ponen de manifiesto una historia de descendencia y refutan la creación a partir de la nada. Los animales no pueden desarrollar una serie de formas ventajosas porque los esquemas estructurales heredados se lo impiden. En este sentido, se ha planteado acertadamente que

el trabajo de la selección natural se parece más al de un zapatero remendón que al de un ingeniero.

Resulta interesante, al respecto, destacar una cita en la que Darwin plantea este aspecto:

"*...Tampoco debemos maravillarnos de que todas las disposiciones de la naturaleza no sean - hasta donde podemos juzgar - absolutamente perfectas, como en el caso del mismo ojo humano, ni de que algunas de ellas sean ajenas a nuestra idea de lo adecuado. No debemos asombrarnos de que el aguijón de la abeja, al ser utilizado contra un enemigo, ocasione la muerte de la propia abeja; de que se produzcan tan gran número de zánganos para un solo acto, y de que sean luego matados por sus hermanas estériles; ni del asombroso derroche de polen de nuestros abetos; ni del odio instintivo de la reina de las abejas hacia sus propias hijas fecundas; ni de que los icneumónidos que se alimenten en el interior del cuerpo de las orugas vivas. Lo raro, dentro de la teoría de la selección natural, es que no se hayan descubierto más casos de falta absoluta de perfección"* (Darwin, 1859).

Otro aspecto crítico de una visión clásica de la adaptación, es la idea de que la selección natural, operando constantemente, permite incrementar el nivel de adaptación de las especies a su entorno. Así, el ambiente plantea ciertos "problemas" que los organismos necesitan "resolver" y la evolución, a través de la selección natural, constituye el mecanismo para alcanzar gradualmente dichas soluciones. Ahora bien, si la evolución es el proceso de creciente adaptación de los organismos a su nicho, los nichos deben preexistir a las especies que se adaptarán a ellos. Así, existirían nichos vacíos en espera de ser ocupados por nuevas especies. Aquí se presenta un debate vinculado con la definición del concepto de nicho, ya que las especies no sufren el ambiente de manera pasiva sino que crean y definen el medio en el que habitan. Hay una interacción constante entre el organismo y el medio por lo cual, aunque el organismo pueda estar en un proceso de adaptación al entorno mediante selección natural, la evolución del propio organismo va cambiando dichas circunstancias.

Un modelo alternativo que ofrece una respuesta a los problemas planteados es la hipótesis de la Reina Roja (Red Queen) propuesta por Leigh Van Valen (1973). En este modelo, el nicho de los organismos está continuamente modificándose, y las especies acomodándose a esas alteraciones mediante el proceso selectivo. Así, la selección natural permite que los organismos mantengan su nivel de adaptación, pero no lo mejora. A partir de este enfoque, el concepto de adaptación se modifica notablemente. Deja de ser un proceso de

mejoramiento creciente, que lleva a un diseño ideal para el “óptimo” aprovechamiento de un determinado nicho; para pasar a ser un movimiento lento del nicho a través del tiempo y del espacio, acompañado por un cambio en las especies que siempre están un paso atrás, ligeramente mal adaptadas.

Las evidencias más relevantes en favor de la hipótesis de la Reina Roja provienen del análisis de los ritmos de extinción de numerosas especies a partir del estudio del registro fósil. Estos datos evidencian que la probabilidad de extinguirse de una especie parece ser constante dentro de un mismo grupo de organismos independientemente de su tiempo de existencia. En otras palabras: especies que han existido durante largo tiempo, tienen la misma probabilidad de extinguirse que otras más recientes (Flessa, 1986, Hoffman, 1991).

10.4. La necesidad de jerarquizar del proceso evolutivo: micro y macroevolución

Observando los patrones del registro fósil algunos paleontólogos han objetado otros dos aspectos básicos de la síntesis moderna: el argumento gradualista y el argumento reduccionista (Gould y Eldredge, 1972). El primer argumento objetado —que ya estaba presente en la visión de Darwin—, sostiene que todos los procesos evolutivos responden a la lenta y gradual acumulación de cambios genéticos a lo largo de las generaciones. El segundo argumento cuestionado, es el que sostiene que los cambios evolutivos que se observan en grandes escalas temporales, llamados *macroevolutivos* —tales como la aparición de los grandes grupos de organismos o las extinciones masivas—, son explicables en términos de los mismos procesos que explican la adaptación de las poblaciones.

En cuanto al primer argumento, Darwin concebía al proceso evolutivo como una serie de cambios graduales y continuos. Sin embargo, el registro fósil mostraba serias discontinuidades y, en la mayor parte de los casos, las formas intermedias estaban ausentes. Esta era una de sus más grandes preocupaciones, ya que consideraba que este problema podía hacer tambalear su teoría. Si bien esta dificultad no fue superada mientras vivió, Darwin confiaba en que, con el tiempo, nuevos fósiles irían llenando las secuencias incompletas. Sin embargo, esto no ocurrió. La principal objeción a la visión gradualista proviene de los paleontólogos N. Eldredge y S. Gould (1972) quienes, a partir del análisis de datos del registro fósil, observaron que las nuevas especies parecen originarse por procesos generalmente abruptos, en períodos muy breves

en escala del tiempo geológico. Estos autores, también señalan que una vez establecidas, las nuevas especies se mantienen sin mayores cambios durante largos periodos, es decir permanecen en *estasis evolutiva*, hasta que, eventualmente se origina una nueva especie. A partir de esta interpretación, el registro fósil resulta ser un fiel reflejo de la historia de la vida, ya que la ausencia de formas transicionales se debe a que éstas, en muchos casos, no existieron. En este enfoque, conocido como "*modelo de los equilibrios interrumpidos*" o "*modelo de los equilibrios discontinuos"*, la evolución es un proceso esencialmente discontinuo y no gradual (Stanley 1979; Gould and Eldredge, 1977, 1993).

Los modelos de especiación cuántica, que explican el origen de nuevas especies en tiempos breves a partir de la fijación debida al azar de cambios genéticos drásticos (Mayr, 1954; Templeton, 1980; Carson, 1982), contribuyeron a la fundamentación de la propuesta de los paleontólogos discontinuistas. Al mismo tiempo, investigaciones posteriores aportaron el análisis de secuencias fósiles que apoyan esta postura (Malmgren, et al.1983; Bell et al., 1985). Sin embargo, también se han estudiado secuencias fósiles que ponen en evidencia el cambio gradual dentro de ciertos linajes (Sheldon, 1987). Esta discusión aun permanece abierta (Gould and Eldredge, 1993; Levinton, 1988). Sin embargo, actualmente no se considera que los modelos gradualista y discontinuista son mutuamente excluyentes, sino que se discute cuál de ellos es el más representativo de los patrones preponderantes en la evolución de la vida.

El segundo argumento cuestionado por estos autores se refiere a si es posible interpretar la macroevolución en términos de los procesos microevolutivos que explican el cambio a nivel intrapoblacional. Según los partidarios de la síntesis, la diversidad de géneros, familias, órdenes y hasta de grupos taxonómicos de mayor rango sería consecuencia de la acción sostenida del proceso selectivo durante largos períodos de tiempo geológico. La selección natural se extendería como mecanismo explicativo de los patrones observados en el nivel macroevolutivo, extrapolando los procesos que ocurren en el seno de las poblaciones y especies para explicar los patrones de diversidad biológica a gran escala.

Los críticos de la síntesis proponen, en este punto, que los fenómenos macroevolutivos se caracterizan por patrones y procesos que les son propios, los cuales no pueden ser reducidos a los procesos microevolutivos. Esta visión de la evolución, que reconoce diferentes niveles, se ha denominado "*jerarquización de la teoría evolutiva*".

En el campo de la genética, este enfoque se corresponde con el conocimiento de que también en el programa genético existe una jerarquización. Esto significa que no todos los genes tienen la misma importancia evolutiva. La mayor parte de ellos son genes estructurales, que codifican información para la síntesis de proteínas relacionadas con la estructura del organismo, pero algunos genes son reguladores. Estos últimos serían especialmente importantes ya que controlan la expresión de otros genes. De este modo, el cambio en un gen regulador tendría generalmente consecuencias desastrosas. Sin embargo ocasionalmente una mutación exitosa en un gen regulador, podría producir sorpresas que cambien el curso de la evolución.

Así, las "novedades evolutivas" que afectan al nivel macroevolutivo, tales como la aparición de nuevos órganos, nuevos planes de organización, nuevos grupos de organismos, no surgirían por la lenta acumulación de cambios puntuales de los genes estructurales, sino por cambios a nivel de genes maestros, capaces de modificar la expresión de otros genes, los tiempos en el desarrollo, las proporciones entre diferentes estructuras y otros cambios con consecuencias notables en la estructura del organismo. Los cambios alométricos, las heterocronías y otros procesos alternativos, más que los procesos microevolutivos, serían los mecanismos capaces de explicar el cambio macroevolutivo, caracterizado por la discontinuidad más que por la continuidad, por lo abrupto más que por lo gradual.

10.5. La relación entre genotipo y fenotipo

En la concepción clásicamente asumida por la genética de poblaciones, los genes son responsables de dirigir la maquinaria celular, crear al organismo, perpetuar a las poblaciones y especies, de modo que serían virtualmente inmortales. Según algunos biólogos críticos de esta mirada reduccionista, esta representación, a la que Evelyn Fox Keller ha denominado "discurso de acción de los genes", refuerza la creencia de que todo lo que se espera comprender acerca de los seres vivos está contenido en la secuencia del ADN (Fox Keller, 2000). Richard Lewontin (2000) denomina "falacia genética" a la ilusión que consiste en reforzar un fetiche en torno a lo que el ADN es capaz de hacer y que en realidad no hace. En esta metáfora, el ADN es presentado como la molécula directriz y autosuficiente. Sin embargo, el ADN es incapaz de hacer copias de sí mismo porque para ello requiere de enzimas y, si bien su secuencia de nucleótidos es utilizada por la maquinaria celular para determinar la

secuencia de aminioácidos de la proteína a sintetizar, las proteínas son hechas por otras proteínas, de modo que sin esa maquinaria de formación proteica, nada podría ocurrir. Pese a que numerosos modelos revelan la interdependencia de estos procesos celulares, así como la importancia de los factores ambientales en la expresión genética, la repetición sistemática de conceptos que refuerzan la visión reduccionista, va creando la falsa impresión de un mundo biológico simple y autorreferente, en que la respuesta final está en el gen. Como contraparte se ignoran las jerarquías e interacciones complejas entre genes, las interacciones entre el genoma y el ambiente celular, el papel del entorno tisular, el comportamiento del organismo como un todo y la relación con el ambiente, que explica una buena parte de los resultados fenotípicos. En este mismo sentido, Lewontin destaca que no sólo a un mismo genotipo le pueden corresponder diferentes fenotipos conforme al ambiente en que se desenvuelva el organismo, sino que incluso idénticos genotipos en un mismo contexto ambiental pueden producir variantes fenotípicas debido al papel que juega el azar en los complejos procesos del desarrollo embrionario, fenómeno al que denomina "*ruidos del desarrollo*" (Lewontin, 2000). En ese sentido, frente al reduccionismo del enfoque de la genética de poblaciones, un campo relativamente reciente denominado Evo-Devo (Evolution and Development), resultado de la articulación de la biología del desarrollo y la evolución, promete aportar interesantes respuestas a preguntas clave acerca de la historia de la vida (Lewontin, 2002). Estas preguntas incluyen, por ejemplo, los mecanismos involucrados en el rápido origen de caracteres "clave" en la evolución de grandes grupos de organismos o la comprensión de los procesos de desarrollo generadores de los diversos planes corporales.

10.6. El concepto de contingencia

Como hemos visto recorriendo las diferentes problemáticas de la biología evolutiva, la historia de la vida puede ser estudiada integrando diferentes enfoques: el seguimiento espacial y temporal de la dinámica de los genes aplicando los modelos genético poblacionales, el análisis de los patrones macroevolutivos contenidos en el registro fósil, el estudio de los patrones de desarrollo en relación con el surgimiento de novedades evolutivas, la reconstrucción filogenética de las relaciones entre los diferentes grupos de organismos y el análisis de la distribución espacial de los organismos empleando los modelos de la biogeografía evolutiva. Todos estos abordajes son complementarios y necesarios

en su conjunto para construir una representación integrada de la historia de la vida. Más allá de los debates abiertos en todos estos campos, una mirada integradora nos devuelve una imagen compleja: las características de los organismos son el resultado de una historia en la que se combinan procesos deterministicos que pueden ser modelizados y episodios aleatorios que, en diferentes escalas, han influido significativamente en el rumbo de la evolución. Desde las mutaciones en la molécula de ADN —bases del proceso de origen de la variabilidad—, hasta las extinciones masivas debidas a trastornos planetarios fortuitos —en el nivel macroevolutivo—, pasando por los procesos de deriva genética en las poblaciones y el "ruido del desarrollo" durante el proceso de desarrollo embrionario individual; el azar muestra jugar un papel insoslayable en la comprensión del curso de la evolución de la vida en la Tierra. Por ello, resulta evidente que se trata de una historia para la cual —dentro de las restricciones que imponen sus características constitutivas de la vida y de sus principales linajes— existieron múltiples trayectorias posibles. A diferencia de algunos fenómenos físicos en los que dadas ciertas condiciones iniciales es posible predecir el comportamiento del sistema, en la evolución biológica no es posible anticipar un rumbo necesario ni establecer claras tendencias. Se trata por ello de un proceso *contingente*. En consecuencia es posible comprender que la Biología evolutiva es una ciencia histórica, que explora fenómenos irrepetibles. En palabras de Ernst Mayr (1904-2005)

"*El enfoque histórico-narrativo es el único válido, científica y filosóficamente, para explicar fenómenos únicos*" (Mayr, 1998)

11. A modo de conclusión: reflexiones acerca de la búsqueda de vida en el cosmos

Uno de los aspectos más destacados de la Teoría Evolutiva de Darwin es que no quedó cristalizada en sus postulados originales sino que constituyó el punto de partida de una compleja trama teórica que se vio enriquecida por numerosos aportes posteriores. Las polémicas actuales acerca del protagonismo de la selección natural, el modo, el tiempo y la jerarquización del proceso evolutivo, se van nutriendo de nuevas miradas. Manteniendo el marco de interpretación que aún proporciona el darwinismo clásico, la teoría evolutiva se recrea y crece.

A lo largo de este artículo, he tratado de fundamentar que la biología evolutiva es un cuerpo teórico indispensable para comprender el origen de la vida y su diversificación. La idea de interacción entre azar y necesidad, es decir la estrecha interrelación que opera entre procesos selectivos y eventos estocásticos es una aproximación fértil para explorar el origen de la vida en la Tierra ya que es muy probable que reglas de este tipo hayan operado luego de la evolución química, desde las primeras etapas de la evolución prebiótica. Más allá del refinamiento de las técnicas que se empleen, ya sea que el estudio asuma un abordaje sistémico o molecular, los modelos de la biología evolutiva constituyen el enfoque inspirador y el marco de interpretación de los estudios acerca del origen de la vida la Tierra. En ese sentido, es razonable aceptar que este marco puede resultar de gran utilidad para detectar y estudiar procesos análogos de complejización de la materia en otros sitios del Universo. Es probable que reglas similares puedan aplicarse a la comprensión del origen y la evolución de otras formas de vida. Sin embargo, el principal obstáculo se presenta a la hora de detectar e identificar procesos análogos a la historia de la vida en nuestro planeta. Esta dificultad se desprende de la comprensión crítica de las ideas de la Teoría Evolutiva, incluyendo sus debates contemporáneos.

Hemos discutido que las características de la vida en la Tierra y su diversidad no son resultados necesarios de un proceso predecible en que, dadas ciertas condiciones iniciales, los productos serán siempre los mismos. Por el contrario, se trata de una historia contingente, única, irreversible e irrepetible. Una historia que se sustenta a sí misma, en una compleja trama de azar y necesidad, en que los organismos evolucionan en estrecha relación con un ambiente siempre cambiante que los modela, pero que, al mismo tiempo, es el resultado de su propia existencia. Esta mirada pone de manifiesto la dificultad que supone explorar la existencia de sistemas complejos análogos a los representantes de la vida en la Tierra en escenarios espaciales y temporales muy diferentes del que conocemos.

La historia de la vida en la Tierra es singular. Del mismo modo que la historia de las sociedades humanas y aun nuestras propias historias personales, la historia de la biodiversidad terrestre no es el resultado de leyes universales. Si incorporamos humildemente esta comprensión, la búsqueda de vida fuera de la Tierra debe asumir una premisa que puede resultar muy significativa: aquello que buscamos puede ser sustancialmente diferente de lo que conocemos.

Una búsqueda que se limite a la detección de procesos y resultados característicos de nuestra propia y única historia en otros sitios del Universo, no iluminará nuestra aventura intelectual, ya que una impensable gama de fenómenos “atípicos” quedarán ocultos y fuera de nuestro interés. Aunque pueda parecer una advertencia desalentadora, enfatizar la condición contingente de la historia de la vida en la Tierra, constituye un desafío clave para ampliar la mirada.

Referencias

Bell, M. A., Baumgartner, J. V., y Olson, E. C. Patterns of temporal change in single morphological characters of a Miocene stickleback fish, *Paleobiology*, vol. 11: 258-271, 1985.

Bulmer, M. *Did Jenkin's swamping argument invalidate Darwin's theory of natural selection?, British Journal for the History of Science,* vol. *37(3): 281–297, 2004.*

Carson, H. L. Speciation as a major reorganization of polygenic balances en C. Barigozzi (ed.) *Mechanisms of speciation*, New York, Alan R. Liss, pp. 411-433, 1982.

Darwin, Charles *On the origin of species by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for existence*, London, Murray, 1859.

Eldredge, N. y Gould, S. Punctuated Equilibria: an alternative to phyletic gradualism en Schopf, T. J. M. (ed.) *Models in paleobiology,* San Francisco, Freeman, Cooper and Company, 1972.

Flessa, K. W. et al. Causes and consequences of extinction, en D.M. Raup and D. Jablonsky (eds.), *Patterns and Processes in the History of Life*, Berlin, Springer-Verlag, pp. 235-257, 1986.

Fox Keller, E. *Lenguaje y vida. Metáforas de la biología del siglo XX*, Buenos Aires, Manantial, 2000.

Gould, S. J. y Eldredge, N. Punctuated equilibria: The tempo and mode of evolution reconsidered, *Paleobiology,* vol. 3: 115-151, 1977.

Gould, S. J. y Eldredge, N. Punctuated equilibrium comes of age, *Nature,* vol. 366: 223-227, 1993.

Gould, S. J. y Lewontin, R.C. The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 205: 581-598, 1979.

Gould, S. J. *Dientes de gallina y dedos de caballo: más reflexiones acerca de la historia natural*, Madrid, Blume, 1984.

Gould, Stephen J. Sombras de Lamarck en *El pulgar del panda,* Barcelona, Ediciones Orbis SA, 1985.

Hoffman, A. Testing the Red Queen Hypothesis, *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 4: 1-7, 1991.

Jacob, F. *La lógica de lo viviente*. Barcelona, Ed. Laia, 1987.

Kimura, M. A stochastic model concerning the maintenance of genetic variability in quantitative characters, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* vol. 54: 731-736, 1965.

Kimura, M. Evolutionary rate at the molecular level, *Nature* vol. 217: 624-626, 1968.

Kreitman, M. The neutral theory is dead. Long live the neutral theory, *BioEssays***,** vol. 18(8): 678-683, 1996.

Lamarck, J. B. *Philosophie Zoologique*, Barcelona, Editorial Mateu, 1809 (editada en 1971).

Levinton, J. S. *Genetics, Paleontology, and Macroevolution*, Cambridge, Cambridge University Press, 1988.

Lewontin, R. *Genes, organismos y ambiente*. *Las relaciones de causa efecto en biología*, España, Gedisa, 2000.

Lewontin, R. Directions in Evolutionary Biology, *Annual Review of Genetics,* vol. 36: 1-18, 2002.

Malmgren, B. A., Berggren, W. A, y Lohmann, G. P. Evidence for punctuated gradualism in the late Neocene *Globorotalia tumida* lineage of planctonik Foraminifera, *Paleobiology,* vol. 9: 377-389, 1983.

Mayr, E. Change of genetic environment and evolution, en J. Huxley, A.C. Hardy, y E.B. Ford (eds.) *Evolution as a Process*, London, Allen and Unwin, pp. 157-180, 1954.

Mayr, E. *Así es la Biología*, Madrid, Debate, 1998.

Monod, J. *El azar y la necesidad,* Barcelona, Ed. Tusquets, 1981.

Ohta, T. The neutralist–selectionist debate, *BioEssays*, vol. 18(8): 673-677, 1996.

Sheldon, P. R. Parallel gradaulistic evolution of Ordovician trilobites, *Nature*, vol. 330: 561-563, 1987.

Stanley, S. M. *Macroevolution: Pattern and Process*, San Francisco, W.H. Freeman, 1979.

Starck, D. y Kummer, B., Zur Ontogeneses des Schimpancenschaedels, *Anthropologischer Anzeiger*, vol. 25: 204, 1962.

Templeton, A. R. The theory of speciation via the founder principle, *Genetics*, vol. 94: 1011-1038, 1980.

Van Valen, L. A new evolutionary law, *Evol. Theory*, vol. 1: 1-30, 1973.

Zuckerland, E. y Pauling, L. Evolutionary divergence and convergence of proteins, en V. Bryson y H.J. Vogel (eds.) *Evolving Genes and Proteins*, New York, Academic Press, pp. 97-166, 1965.

Capítulo 13

Evolución de las capacidades cognitivas

Eduardo Mizraji

Resumen Durante un extenso período de tiempo, los organismos unicelulares fueron los únicos habitantes de la Tierra. En ese período estos organismos produjeron, durante su evolución y diversificación, variados dispositivos macromoleculares que refinaron sus capacidades de adaptación a ambientes variables. Estos dispositivos prepararon la veloz aparición y posterior evolución de los organismos multicelulares. Muy tempranamente en la evolución de los multicelulares, emergieron los animales con sistema nervioso. Éste se transformó en un sistema particularmente útil para la adaptación a los ambientes de variabilidad extrema, a los que eran continuamente expuestos los animales por sus naturales condiciones de vida. En algunos animales, y en especial en la especie humana, el sistema nervioso evolucionó de forma de permitir actividades cognitivas. El cerebro humano unido a otros eventos, como la capacidad de emisión de la palabra, la presencia de manos, y las concomitantes modificaciones anatómicas asociadas con la posición erguida, provocó la explosiva evolución cultural de la que hoy somos herederos y partícipes. Es un asunto quizá todavía indecidible, cuánto hay de contingente y cuánto de universal en la cultura humana (y por consiguiente en nuestros códigos lingüísticos o matemáticos), problema cuyo planteo es importante en el campo de la astrobiología.

Abstract For a long period of time, the unicellular organisms were the only inhabitants of Earth. In such period these organisms produced, during their evolution and diversification, varied macromolecular devices which refined their capacities to adapt to variable environments. These devices prepared the fast subsequent evolution of multi-cellular organisms. Early in the evolution of multi-cellular organisms, animals with a nervous system arose. This became a particularly useful system for the adaptation to the extreme variability environments, to which animals were continuously exposed due to their natural life conditions. In some animals, and especially in the human species, the nervous system evolved in a way that allows

Eduardo Mizraji (✉)

Grupo de Modelización de Sistemas Cognitivos, Sección Biofísica, Facultad de Ciencias (UDELAR), Iguá 4225, 11400 Montevideo, Uruguay

mizraj@fcien.edu.uy

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 297 - 317, © 2010 UNESCO-Montevideo.

cognitive activities. The human brain, together with other events, such as the ability to emit words, the presence of hands, and the corresponding anatomic modifications associated with the erect posture, caused the explosive cultural evolution of which we are heirs and partakers today. It is still not decided how contingent and how universal the human culture is (and therefore our linguistic or mathematical codes) —a problem whose posing is important in the field of astrobiology.

1. Introducción

"*El hombre no es más que un junco, el más débil de la naturaleza; pero es un junco pensante. Poco necesita el universo para aplastarlo: basta un vapor, una gota de agua. Pero aunque el universo lo estuviese matando, el hombre sería más noble que eso que lo mata, porque sabe que muere, y sabe el poder que el universo tiene sobre él; el universo, en cambio, no sabe nada*". Blaise Pascal

El tema que aquí nos ocupa es el de la biología y evolución del conocimiento en los seres de nuestro planeta. Este tema fascinante, tiene una región factual relativamente sólida y estable, constituida por evidencia anatómica, fisiológica e histórica relativa a la evolución del sistema nervioso y la emergencia de la cultura en la especie humana. Pero tiene también una región teórica, dónde se indagan las condiciones que facultan la emergencia de complejidad y su potencial evolución hacia situaciones de complejidad creciente. Esta segunda región carece de evidencias o teorías que cuenten con aceptación universal, aunque su importancia es central para comprender el mundo en que vivimos. En esta región, más que resultados seguros, tenemos problemas relevantes, y vías sugeridas para su solución.

En este trabajo, se reproducen parcialmente, y con variadas modificaciones, conceptos incluidos en mi trabajo previo "Emergencia de sistemas cognitivos", perteneciente al libro "Vida y Cosmos: Nuevas Reflexiones" J.A. Fernández, E. Mizraji (Eds.) EUDECI, Montevideo, 1995. Por otra parte, se comentan algunos resultados teóricos sobre las condiciones que promueven la emergencia y la evolución de la complejidad, y se analizan algunas de las perspectivas actuales que emanan de este problema abierto.

2. La evolución neural

2.1. Las células

Está generalmente aceptado que el planeta Tierra se formó hace unos 4.600 millones de años y que los organismos unicelulares ya estaban presentes hace unos 3.500 millones de años. El origen de las primeras células sigue siendo un profundo misterio. No cabe duda, sin embargo, que el salto hacia estructuras celulares es uno de los más dramáticos procesos de generación de complejidad ocurridos en nuestro universo. Hasta donde sabemos, los organismos unicelulares, y en especial las bacterias, fueron durante un muy extenso período los únicos habitantes de nuestro planeta. La evidencia paleontológica lleva a estimar que los primeros organismos multicelulares se formaron hace unos 580 millones de años.

A lo largo de su prolongada evolución, las bacterias desarrollaron una complejísima maquinaria bioquímica. En ella ya están presentes los catalizadores enzimáticos que definen las rutas de las transformaciones químicas que constituyen el metabolismo celular, las complejas proteínas que conforman transportadores de membrana, los receptores macromoleculares —verdaderos órganos del sentido químico para estas células— y los canales iónicos que contribuyen a la existencia de potenciales eléctricos a través de las membranas. Junto a estos dispositivos macromoleculares, en estas células bacterianas emergieron "interruptores" moleculares, conformados por proteínas alostéricas, que eran capaces de modificar dramáticamente la afinidad por una molécula (o zona molecular) en función de la presencia o ausencia de otra molécula que oficiaba de señal regulatoria. Estos interruptores cumplían roles diversos en la bacterias evolucionadas, como la expresión adaptativa de genes o la optimización termodinámica de los procesos metabólicos. Según sostuvo Jacques Monod, estas proteínas alostéricas son las responsables de la emergencia a nivel molecular de los sistemas cibernéticos de regulación fisiológicos. Estos sistemas fueron los que facultaron las vías de evolución hacia organismos de complejidad creciente. Esta creciente complejidad coexiste con una creciente capacidad de adaptación a ambientes y situaciones variables. Asumiendo que la "invención" evolutiva de la molécula de ADNy de su capacidad de codificar información era el "primer secreto de la vida", Monod llamó a la existencia de estas proteínas alostéricas "el segundo secreto de la vida".

Algunas bacterias tienen la habilidad de moverse de modo que consiguen aproximarse o alejarse de un ambiente químico particular (esta capacidad se denomina "quimiotactismo"). En estas bacterias que poseen quimiotactismo, la composición química de los ambientes es analizada mediante un elaborado sistema de receptores macromoleculares situados en la superficie celular; estos receptores activan señales bioquímicas internas que a su vez condicionan, mediante el sentido de rotación de un flagelo, el tipo de respuesta motora.

Estas complejidades sugieren que los "descubrimientos" cardinales relativos a la organización biológica ya ocurrieron en estas bacterias. En ellas fueron resueltos los problemas termodinámicos y cibernéticos básicos. Los complejos procesos evolutivos posteriores (que en un intervalo de *sólo* unos 600 millones de años "condujeron" de los primeros pluricelulares a los homínidos) se apoyan en una colección de recursos fisiológicos ya edificados por los unicelulares.

Digamos al pasar que la elevada velocidad (en escala geológica) del tránsito evolutivo hacia complicados organismos pluricelulares, evidencia que estas bacterias ya poseían una muy elevada complejidad. Pero aún no sabemos medir correctamente la complejidad biológica. En este sentido, las medidas de la complejidad biológica quizá deban enfatizar primariamente la naturaleza de la organización bioquímica y su potencial evolutivo, y sólo secundariamente el número de células de un organismo. Encontrar estas medidas de complejidad es un importante (y hoy en día muy investigado) problema abierto. Deseamos sin embargo señalar como fuente de futuros desarrollos la idea de "variedad" explorada por Ashby hace más de 50 años, especialmente en su libro "An Introduction to Cybernetics". Esta es una noción a la vez simple y profunda, con la potencialidad de ser adaptada a diferentes contextos: variedad de respuestas regulatorias codificadas por un genoma bacteriano, variedad de performances adaptativas almacenadas por la memoria neural de un mamífero, variedad de capacidades de reacción ante crisis almacenadas por la ciencia y la tecnología que posea una sociedad humana. La complejidad que los biólogos querrían medir plausiblemente sea directamente proporcional a esta variedad de Ashby (el alcance de esta noción está analizado con algún detalle en mi libro "El segundo Secreto de la Vida", incluido en la bibliografía).

Los diversos sistemas nerviosos de los animales multicelulares (y que aparecen ya en algunos de los primeros invertebrados) muestran células especializadas en transmitir y generar señales: las neuronas. La Figura 1 muestra neuronas de la corteza cerebral de un mamífero. Estas células se caracterizan por poseer varias prolongaciones especializadas en la recepción de señales lla-

madas dendritas, y una única prolongación —el axón—, por la cual la neurona hace transitar las respuestas que emite. En cada neurona puede haber varias dendritas pero sólo hay un único axón. La comunicación entre las neuronas, o entre una neurona y otro tipo de célula, ocurre mediante señales electroquímicas.

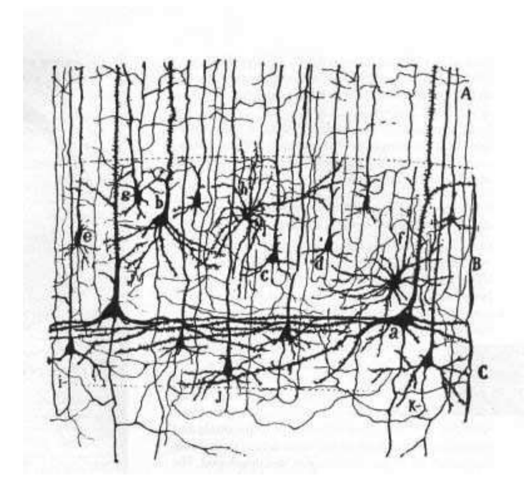


Fig. 1 - Neuronas de la corteza cerebral

La zona de contacto entre dos neuronas (y también entre una neurona y otra célula) se llama sinapsis, y se ha demostrado que estas sinapsis son regiones en las que existen muy complicados dispositivos macromoleculares. Existen sinapsis (a veces llamadas "sinapsis eléctricas") que ofician como conexiones directas entre señales electroquímicas. En los sistemas nerviosos de los animales más complejos adquieren preponderancia las sinapsis que transportan información a través de mediadores químicos ("sinapsis químicas"). En ellas, hay receptores capaces de conocer señales químicas representadas por moléculas denominadas neurotransmisores.

Las señales electroquímicas que intervienen en la codificación neural (llamadas potenciales de acción), involucran eventos moleculares y transportes de cargas iónicas muy precisos. Estas señales son energéticamente costosas y relativamente lentas: la duración típica de un potencial de acción es de aproximadamente 1 milisegundo y su magnitud es del orden de las decenas de milivoltios. Los potenciales de acción generados por una neurona y transportados por su axón, resultan de la integración de las múltiples influencias que la neurona recibe. Esta capacidad integradora es un evento neurocomputacional

de importancia central para la función neural. Se estima que una neurona de la corteza cerebral de un mamífero puede recibir influencias directas de alrededor de diez mil neuronas. En muchos casos, los códigos de comunicación neuronal se basan en la modulación de la frecuencia de potenciales de acción emitidos por la neurona. Por consiguiente, la neurona es una célula que, además de las actividades bioquímicas básicas para toda célula, posee una extensa colección de dispositivos moleculares que la capacitan para codificación y decodificación de información.

2.1. Los órganos

El aumento en estructura y en tamaño de los seres multicelulares, fue concomitante con divisiones de trabajo en sus células. Los individuos multicelulares interactúan con el ambiente a través de las superficies corporales, pero su vida como individuo depende de la función de todas sus células. La mayoría de estas células están alejadas de las superficies. Estas células interiores no podrían acceder a los nutrientes que les son esenciales de no mediar algún sistema de distribución. En diversos animales, estos sistemas de reparto están representados por una variada gama de sistemas circulatorios. Estos sistemas emplean células que se especializan en tapizar "lagunas" intracorporales y otras que poseen una actividad contráctil que le permite hacer circular estos líquidos intracorporales.

En general, se utiliza en este marco la palabra "sistema" para caracterizar a distintos tipos de órganos, constituidos por diversos tipos celulares, y especializados en algún tipo de función. Un sistema circulatorio puede estar formado (entre muchas otras cosas) por un conjunto de tubos construidos usando variados tipos celulares, por un tipo de líquido que circula por estos tubos, y por algún sistema mecánico celular que tiene a su cargo la propulsión del líquido.

El sistema nervioso surgió en los animales multicelulares como un conjunto de estructuras capaces de crear vías de comunicación entre regiones lejanas del cuerpo.

Desconocemos el origen del sistema nervioso. Algunos de los comentarios que haremos a continuación están basados en el texto de Sarnat y Netsky. Una versión actualizada sobre la evolución del sistema nervioso se encuentra en la revisión de Ghysen incluida en las referencias. Se suele asumir que el primer sistema nervioso de la filogenia pudo ser similar al a las actuales hidras,

donde existe una red de células nerviosas extendida por todo el organismo. Los gusanos planos, como la planaria, muestran otro tipo de organización: en ellos los cuerpos celulares de las neuronas se acumulan en ciertas estructuras conectadas mediante cordones de fibras nerviosas. En otros gusanos (v.g. en los anélidos), la concentración de las células nerviosas produce conglomerados neuronales llamados ganglios. Estos ganglios se organizan según patrones de segmentación que estos gusanos poseen, y se conectan entre sí (así como con otras estructuras corporales) mediante cordones de fibras nerviosas. En los invertebrados el sistema nervioso se diversifica hacia muy diferentes diseños. Estos diseños pueden ser extremadamente complicados, y su eficiencia funcional está testimoniada por el hecho de que hace cientos de millones de años que estos diseños están sobre nuestra Tierra resistiendo eficazmente agresiones variadas.

En los cordados, la base de la organización del sistema nervioso es una estructura embrionaria llamada tubo neural. El sistema nervioso central de los vertebrados adultos permite distinguir dos regiones: la médula espinal, ubicada en un canal óseo constituido por la columna vertebral, y el cerebro (o encéfalo), ubicado en el interior del cráneo. Los anatomistas distinguen en el cerebro tres estructuras básicas: el cerebro posterior (también llamado rombencéfalo), el cerebro medio (o mesencéfalo) y el cerebro anterior (o prosencéfalo). En los mamíferos, y en especial en los primates, el cerebro anterior adquiere una complejidad extrema. Este cerebro anterior muestra a los anatomistas dos estructuras diferenciables: el diencéfalo y el telencéfalo. Este último comprende los hemisferios cerebrales y es en los humanos modernos que las regiones telencefálicas alcanzan su máximo desarrollo.

En la médula espinal existen complejos circuitos neuronales en los que están programadas respuestas reflejas rápidas. Si una rana recibe una agresión localizada en una de sus patas, estos circuitos hacen que la rana retire su pata de la zona de la que procede la agresión. Estos reflejos de retirada ocurren sin directa intervención de las estructuras neurales del encéfalo (aunque el encéfalo influye de diversos modos sobre los núcleos motores medulares).

El cerebro posterior está, al igual que la médula, especializado en procesar la información cercana. Al rombencéfalo llegan, por ejemplo, sensaciones vinculadas a estímulos mecánicos, a la temperatura, al gusto y al equilibrio. También el cerebro posterior se especializa en desencadenar respuestas reflejas rápidas.

El cerebro medio y el cerebro anterior se especializan en procesar información remota. En estas estructuras se desarrollan las redes neuronales

responsables de la visión y del olfato. Destaquemos que mientras que el análisis de la información cercana utiliza circuitos neuronales de tamaño muy reducido, que son los que sustentan los reflejos de respuesta rápida, la información remota es analizada mediante circuitos neuronales complicados, que evolucionaron hacia un diseño capacitado para asociar patrones perceptuales y conductuales. Por ésto, las influencias sensoriales remotas, como la visión y la olfación, pueden ser asociadas. Estas asociaciones producen una representación enriquecida del mundo exterior, y son la base de una programación más elaborada de las respuestas motoras. El oído es una construcción evolutiva relativamente moderna que utiliza estructuras neurales ubicadas en el cerebro posterior (y originalmente relacionadas con el mantenimiento del equilibrio).

Los procesadores de información cercana operan bajo la presión de la urgencia: el tacto y el gusto analizan acontecimientos adyacentes al cuerpo del animal. Sobrevivir o morir dependen en estos casos de decisiones inmediatas y eficaces. En cambio, la información remota permite que transcurra un tiempo mayor para elaborar las respuestas. El animal puede ensayar ciertas decisiones motoras y modificarlas luego de iniciadas en función de nuevas percepciones. Este cerebro asociativo es la sede en que asientan el aprendizaje y las memorias. Aquí ocurre la retención de performances mediante las que el animal interactúa con su ambiente. Los ensayos y errores de las decisiones motoras terminan, gracias a las memorias, con la creación de un repertorio de decisiones seleccionadas por su eficacia.

Plausiblemente, esta relativamente baja presión de utilización de las áreas asociativas del cerebro anterior es la que permitió la encefalización progresiva de la que el *Homo sapiens* participa. La epopeya cognitiva de nuestra especie es, quizá, una consecuencia de esta baja presión de utilización de las estructuras telencefálicas.

La expansión encefálica de los vertebrados coexiste con un extenso conjunto de modificaciones corporales (ver Figura 2), que modifican a la vez (y entre otras cosas) el perfil del cráneo, el diseño de sus miembros y el aspecto general del cuerpo. Advirtamos el hecho interesante de que el pie del hombre pierde la capacidad prensil presente en los otros antropoides. Esta suerte de retroceso, que transformó a ciertos simios en plantígrados, fue un "reculer pour mieux sauter" evolutivo: a partir de este retroceso surgió la marcha bípeda y la posición erecta, la que a su vez nos inventó las manos. Estos extraordinarios instrumentos, liberados de sus obligaciones prensiles, permitieron la construcción de artefactos.

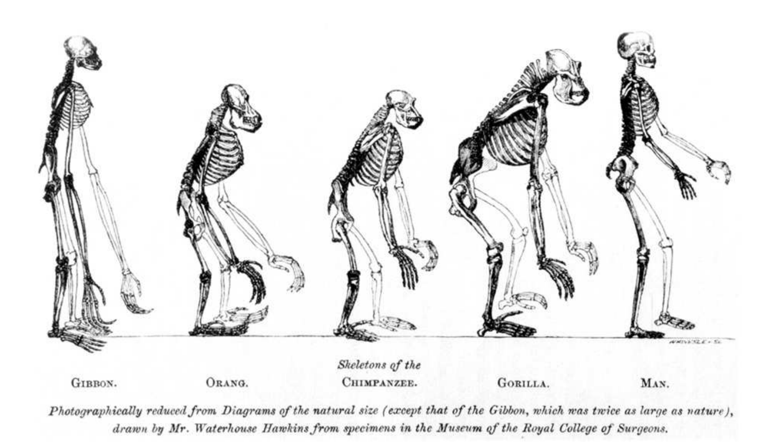


Fig. 2 - Diferencias y similitudes osteológicas entre el hombre, y simios contemporáneos (dibujo tomado de la obra de T.H. Huxley"El lugar del Hombre en la Naturaleza")

3. El ritmo de la evolución

La cronología de la evolución biológica ubica el origen de nuestros inmediatos ancestros, los australopithecinos, hace unos 4 millones de años. Se estima que el *Homo habilis* existió hace unos 2 millones de años. Entre *Australopithecus* y *Homo* se produce un aumento drástico del tamaño relativo del encéfalo. En la Tabla 1 se seleccionan algunos acontecimientos importantes de esta cronología evolutiva.

Desde hace algunos años parece haber cierto consenso respecto a que el hombre moderno (*Homo sapiens sapiens*) tiene una antigüedad de no más de 200.000 años. Si esto es así, entonces toda la explosiva evolución cultural de nuestra especie ocurrió en el lapso de unas 10.000 generaciones.

Las teorías sobre las "aceleraciones evolutivas" son variadas, pero una idea simple y profunda se basa en la existencia de sistemas que logren almacenar "éxitos" parciales. Esto ha sido brillantemente analizado por William Ross Ashby a comienzos de la década de 1950 en su libro "Proyecto para un cerebro", y varias décadas después redescubierto y extensamente analizado por Richard Dawkins en su libro "El relojero ciego". Este almacenamiento de éxitos parciales reduce drásticamente el tiempo esperable para el acceso a metas complejas. Así, la *a priori* improbable aparición de una célula nerviosa se transforma en probable para células cuyos genomas y fenotipos ya poseen casi

todos los recursos moleculares y estructurales para generar, luego de algunas pocas mutaciones o de algún novedoso contexto ambiental, las modificaciones genotípicas asociadas a la morfología y la función neuronal.

Tabla 1 - Cronología aproximada de la evolución biológica

Especies	Antigüedad (millones de años)
Bacterias	3400
Invertebrados	580 - 530
Primeros vertebrados	500
Mamíferos	205
Primates	60
Australopithecus ramidus	4
Homo habilis	2
Homo ergaster	1,8
Homo erectus	1,5
Homo sapiens	0,2

En los sistemas celulares el genoma es uno de los recursos materiales para esta retención de éxitos parciales invocada por Ashby y Dawkins. En los animales con sistemas nerviosos complejos, en los que hay redes de neuronas con la capacidad de sustentar memorias, se suma la capacidad de retención cognitiva de dichos éxitos. En ésta reside la potencialidad de la especie humana de producir su acelerada evolución cultural.

4. La evolución cultural

La esplendorosa aparición de la capacidad de conocer que el ser humano introdujo en nuestro planeta fue generadora de una hermosa mitología. El Prometeo atribuido a Esquilo, explica así el origen de nuestra capacidad cognoscitiva:

"Escuchad, en cambio, los males de los hombres. De niños que eran antes, he hecho unos seres inteligentes, dotados de razón. Os lo diré, no para censurar a los hombres sino para mostraros con qué buena voluntad regalé mis dones. Ellos, al principio, miraban sin ver. Y escuchaban sin oír, y semejantes a los fantasmas de los sueños, al cabo de siglos aún no había cosa que por ventura no confundiesen. No conocían las casas de ladrillos secados al sol, ni el trabajo de la madera; sumergidos vivían como ágiles hormigas en el fondo de cuevas a donde jamás llega la luz. No tenían signo alguno seguro ni del invierno ni de la floreciente primavera ni del fructífero estío, sino que todo lo hacían sin razón, hasta que yo les mostré las salidas y los ocasos de los astros, difíciles de conocer. Después descubrí también para ellos la ciencia del número, la más excelsa de todas, y las uniones de las letras, memoria de todo, laboriosa madre de las Musas."

La Figura 3 muestra al Prometeo decidido y enérgico de Jan Cossiers trayendo la llama del conocimiento a los humanos.



Fig. 3 - Prometeo trayendo el fuego, de Jan Cossiers, Museo del Prado, Madrid.

La ciencia ha realizado esfuerzos sostenidos por dotar de una historia a la transición abrupta relatada por el mito de Prometeo. Se mencionan a continuación algunos resultados de estos esfuerzos.

Mediante las habilidades cognitivas de sus cerebros, algunos primates han conseguido elaborar una especie de herencia de caracteres adquiridos. Se trata de la herencia cultural. Se asume generalmente que la transmisión a los descendientes de habilidades cognoscitivas fue una consecuencia de múltiples factores. Por un lado, la posición bípeda de los homínidos impuso limitaciones en el tamaño de la pelvis femenina. Estas limitaciones, a su vez, determinaron que el parto debiese ocurrir antes de que el feto alcanzase su completo desarrollo anatómico. Este bajo nivel de madurez del recién nacido, le impuso a una prolongada relación social con su madre antes de que pudiese acceder a la autonomía biológica.

Paralelamente, el desarrollo de la capacidad de comunicación mediante un lenguaje simbólico, permitió la transferencia, de una generación a otra, de complejas informaciones retenidas en las memorias biológicas. Estas informaciones pertenecían a diversas categorías: desde el propio código lingüístico hasta las estrategias de captura de presas, pasando por míticas explicaciones cosmogónicas.

Los cerebros de los humanos contemporáneos, muestran regiones con cierto grado de especialización en la construcción del lenguaje. La elaboración de los significados ocurre, en la mayoría de los individuos, en una región del lóbulo temporal del hemisferio izquierdo, el área de Wernicke. La organización de las actividades motoras vinculadas a la emisión de la palabra, ocurre usualmente a nivel de una región del lóbulo frontal del hemisferio izquierdo, el área de Broca.

La búsqueda en cráneos de homínidos fósiles, de estigmas osteológicos de las áreas de Wernicke o de Broca no ha suministrado conclusiones definitorias. Es posible, considerando las características plausibles de la laringe y de la faringe, que algún tipo de lenguaje articulado pudo existir ya en *Homo erectus*.

No hay evidencia definitiva de que la vertiginosa evolución cultural de la especie humana, ocurrida en los recientes milenios, se haya acompañado de algún tipo de evolución genética concomitante. Se han invocado genes específicos y de reciente aparición para explicar la emergencia del lenguaje, pero esto no cuenta aún con el consenso de la comunidad científica. En general se asume que la base de esa evolución cognitiva acelerada ha sido el refinamiento y la potenciación en el sistema nervioso de los humanos de ciertas capacida-

des presentes en algunos mamíferos, como son las memorias, la posibilidad de construir conceptos, las capacidades inductivas y la conciencia. Analicemos brevemente estos puntos.

4.1. Memorias

Hay hoy en día fuertes evidencias experimentales de que la información puede ser codificada y retenida en las redes neuronales debido a la existencia de conexiones sinápticas modificables por las experiencias, proceso globalmente denominado "plasticidad sináptica".

4.2. Conceptualización

Se suele aceptar que las memorias biológicas son relativamente imperfectas y su capacidad de almacenamiento de datos es limitada. Esto provoca que impresiones sensoriales similares sean confundidas. Utilizando un clásico ejemplo digamos que para nuestros ancestros africanos, de las dificultades para distinguir entre los recuerdos de diferentes leones hambrientos resulta un confuso recuerdo de un amenazador león promedio, y, de ahí, el concepto "león". De esta insuficiencia de las memorias neurales emerge una de las más potentes capacidades cognitivas: la conceptualización. Los conceptos son construcciones canónicas, sistemas de referencia a los que remitimos nuestras percepciones y sobre los que sistematizamos la realidad. La capacidad intelectual de estos ancestros africanos que lograron construir el concepto de "león", y así huir ante sus rugidos lejanos, es la que nos permite estar aquí hoy.

4.3. Inducción

En un sentido amplio, que incluya el espacio y el tiempo, la inducción puede ser definida como una tendencia a completar cuadros incompletos. Enfocada hacia el pasado, la capacidad inductiva conduce a la búsqueda de causas. Los mitos cosmogónicos y las teorías científicas racionales tienen en esta habilidad un motor fundamental. Enfocada hacia el presente, la inducción propende a complementar escenas espaciales incompletas. Enfocada hacia el futuro, esta capacidad permite inducir una variedad de escenarios ficticios, y explorar imaginariamente las consecuencias de nuestros actos. Estas capacidades

inductivas requieren la construcción neural de conceptos temporales, con la distinción entre el pasado, el presente y el futuro.

4.1. Conciencia

La actividad consciente es el resultado de un diseño anatómico que permite poner en correspondencia las percepciones del mundo exterior con las percepciones internas, procedentes de las estructuras corporales. Investigadores como Henry Laborit o Gerald Edelman han analizado esta correspondencia, que conduce a una nueva construcción conceptual: el "yo" (o el "ego"). En los individuos conscientes, el ego suministra un sistema de coordenadas cognitivas mediante el que el individuo se vincula con sus contextos espaciales y temporales. El desarrollo de la conciencia puede haber tenido un papel decisivo en el proceso de humanización de los homínidos. Notemos que las capacidades inductivas plausiblemente estaban presentes muy precozmente en el género *Homo*. Las tecnologías atávicas que empleaban los *Homo habilis* explotaban las regularidades de la naturaleza: frotar piedras siempre produce chispas, un hachazo en la nuca de un ciervo lo abate. Pero notemos que el incremento de las interacciones sociales entre congéneres provoca la aparición de interlocutores difícilmente predecibles. En este contexto de complejidad social la conciencia puede haber jugado un rol central. En efecto, el desarrollo de la conciencia suministra al sujeto un conocimiento perceptual de sí mismo, de sus propias reacciones y motivaciones. Mediante su conciencia, el sujeto puede simular en el interior de su mente la forma de reacción del otro, y, por lo tanto, hacer más predecibles las reacciones de sus congéneres. Esta habilidad extendió enormemente el nivel de complejidad afrontable por el cerebro humano. Sigue siendo todavía un tema polémico entre los neurobiólogos si la conciencia es el resultado inespecífico del incremento de tamaño y conectividad de las redes neuronales o, por el contrario, si surge de la existencia de redes neuronales especializadas en establecer la correspondencia entre los mapas neurales del mundo exterior y las percepciones corporales.

Los actuales mapas anatómicos funcionales generados por técnicas como la tomografía por emisión de positrones (PET) o la resonancia magnética nuclear funcional (fNMR) están abriendo un panorama fascinante de la biología de la cognición. Seguramente nuestra comprensión de capacidades cognitivas

centrales, como son la memoria, la conceptualización, la inducción, la conciencia, y en particular la dinámica de la producción y decodificación del lenguaje, será fuertemente auxiliada por la valiosa información que estas técnicas están generando en hoy en día.

La Tabla 2 muestra la cronología de algunos hechos relevantes de la evolución instrumental. El desarrollo de instrumentos sigue siendo considerado como uno de los factores desencadenantes de la selección y la evolución de los homínidos.

Tabla 2 - Evolución instrumental

Inventos	Época aproximada
Útiles de piedra	Hace 1,9 millones de años
Grabados en piedra	35000 años
Primeros cultivos	9000 años
Escritura	3500 a.C.
Papel	100 d.C.
Imprenta de Gutenberg	1400
Telescopio de Galileo	1609
Microscopio de Hooke	1665
Máquina de vapor de Watt	1765
Computadora de Babbage	1834

La existencia de instrumentos nos informa sobre las habilidades neurológicas. En efecto, los instrumentos son objetos teleológicos, esto es, implican un proyecto de utilización. Esto permite suponer que, en cierta medida, el cerebro de los homínidos de hace 2 millones de años ya poseía la capacidad de diseñar sus acciones y de construir futuros imaginarios.

Algunos antropólogos aducen que los objetos construidos sin utilidad visible pueden ser evidencia indirecta de la existencia de un lenguaje simbólico. La idea implicada aquí es que estos objetos cuidadosamente trabajados y en los que no resultan evidentes propósitos instrumentales inmediatos, presuponen la capacidad de transmitir sus significados mediante algún tipo de codificación. Se han descubierto objetos de este tipo con una antigüedad máxima

de 30.000 años. Además, con una antigüedad que va de 30.000 a 10.000 años, aparece el arte rupestre. Estas elaboradas representaciones pictóricas, que se encuentran desde África hasta Europa, sugieren complicadas construcciones culturales. La antigüedad estimada para las pinturas de las cuevas de Altamira y Lascaux es de unos 14.000 años.

¿Cuándo se originó el lenguaje? Este es un enigma que sigue en franca disputa entre los investigadores, y diversas teorías y posiciones están hoy confrontadas. Hace unos 100.000 años comenzó una exacerbación del último período glacial que terminó hace unos 11.000 años. Los objetos decorativos y el arte rupestre son considerados como evidencias indirectas de la existencia de un lenguaje simbólico, y se desarrollaron durante este período final de la glaciación. ¿Pudo ser el proceso de socialización, impuesto por el clima adverso, el desencadenante de actividades simbólicas? Para quienes piensan que esto es posible, el escenario fue el siguiente: el clima adverso llevó a buscar refugio en cavernas y a conseguir materiales con los que abrigarse; esto promovió un aumento drástico de las relaciones interpersonales y éstas precipitaron una evolución cognitiva; esta evolución se acompañó de la formación de un lenguaje simbólico capaz de codificar acciones colectivas complejas, destinadas a obtener alimentos y pieles. Al final de etapa más inhóspita del último período glacial, y dotados de sus varios lenguajes, los humanos abandonaron las cavernas y se dispersaron por el planeta.

El aspecto perturbador de este escenario de generación del lenguaje es que nuestra especie, *Homo sapiens sapiens*, parece haber existido desde hace unos 200.000 años. ¿Pudieron estas actividades permanecer latentes e inutilizadas en los cerebros de nuestros ancestros durante la mayor parte de este período? Este problema sigue abierto.

Las interacciones dinámicas de unidades con umbral, estudiadas por diversos investigadores en diferentes contextos temáticos (mencionemos a von Neumann en el marco de la computación fiable a partir de elementos no fiables, y a Ashby, von Foerster y Walker en el marco de las redes neuronales aleatorias), mostraron que sistemas muy conectados podían colectivamente poseer un umbral por encima del cual se transitaba hacia un estado de completa actividad. En cambio, por debajo de ese umbral poblacional toda posible actividad se extinguía. En este tipo de modelo se resume algún tipo de actividad realizable por los individuos – por ejemplo el desarrollo de un cómputo lógico – mediante una variable colectiva $h(T+1)$ evaluada en un instante $(T+1)$. Esta variable colectiva mide la fracción poblacional de individuos (pueden ser moléculas, seres humanos u objetos tecnológicos) que poseen la habilidad de

realizar esa actividad. Se asume que *h(T+1)* depende del valor de esa misma variable *h(T)* en el instante previo *T* (el tiempo es aquí una variable discreta). La función *h* es una frecuencia relativa (o densidad) y su valor se encuentra entre 0 y 1. Las propiedades específicas de cada sistema definen la dependencia funcional *h(T+1) = F[h(T)]* propia de cada sistema. Si esa dependencia es sigmoidea, se demuestra que los estados *h = 0* y *h = 1* son estacionarios y estables, y que existe un estado estacionario intermedio *h = u* inestable que establece un umbral colectivo del tipo del mencionado. Estas consideraciones teóricas pueden ser relevantes en la discusión de si pueden o no existir densidades de "socialización" críticas que promuevan la emergencia de un lenguaje simbólico y complejo. La Figura 4 ilustra este tipo de dinámica.

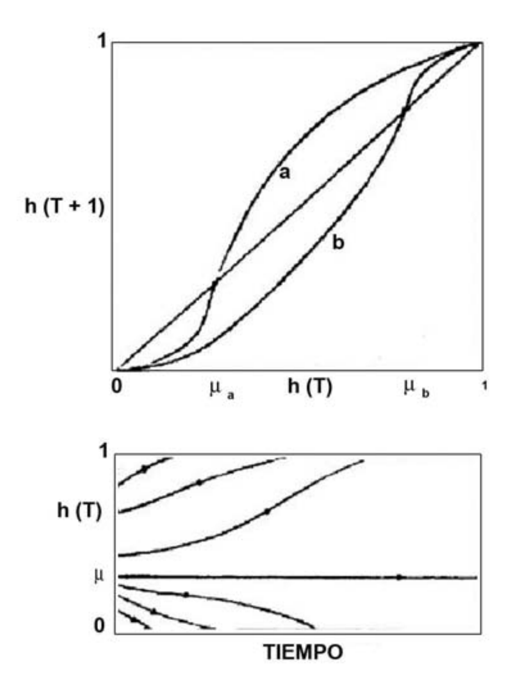


Fig. 4 - *Gráfico superior:* Comportamiento dinámico de dos comunidades conectadas y cuya activación está regidas por una dinámica sigmoidea; la curva *b* corresponde a una red con umbral de activación más alto que la *a*. *Gráfico inferior:* Evolución temporal de una comunidad para distintas condiciones iniciales.

Creado el lenguaje, éste evolucionó a partir de protolenguajes ancestrales de forma similar a como lo hicieron las especies biológicas. Aún antes que Ernst Haeckel construyera sus árboles de la evolución de la vida en la Tierra,

el lingüista August Schleicher construyó árboles evolutivos de los lenguajes humanos. La Figura 5 muestra un fragmento del árbol de evolución del lenguaje determinado por Schleicher. En el final del siglo XX, este esfuerzo fue extensamente complementado por los trabajos del equipo de Luigi Cavalli-Sforza.

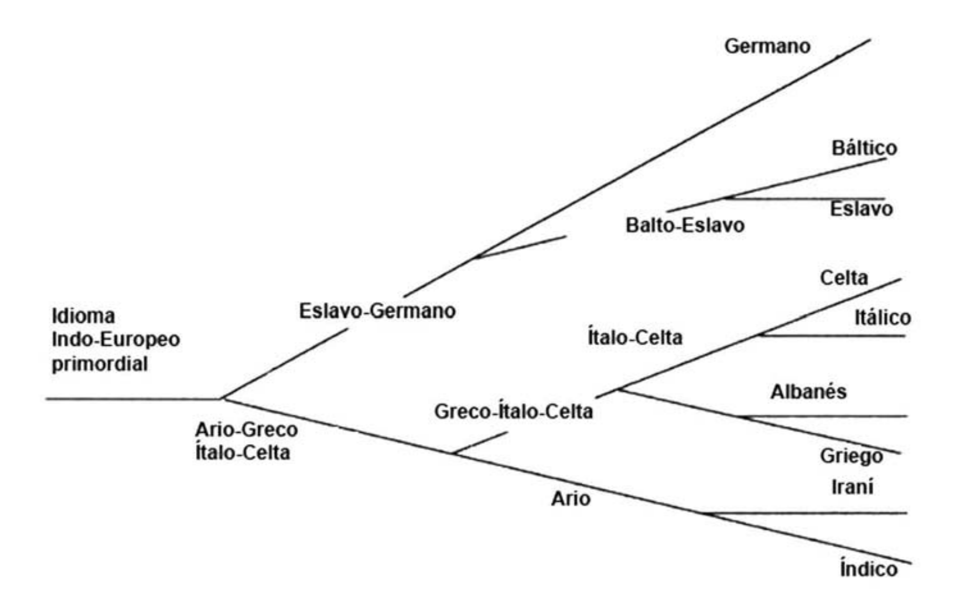


Fig. 5 - Fragmento del árbol de evolución lingüística elaborado por Schleicher.

Digamos que según a la idea sostenida por eminentes historiadores, le correspondió a la mujer la invención de uno de los elementos determinantes de nuestra evolución cognitiva: la agricultura. Restringida su movilidad y constreñidas a permanecer en un pequeño terreno por la crianza de sus hijos, esperando el resultado a veces incierto de las jornadas de caza de sus hombres, mujeres inquisitivas comenzaron a experimentar con los cultivos, y abrieron el mundo de la evolución agrícola. Los primeros cultivos se realizaron hace unos 9000 años, y a partir de ahí, se comenzó a transitar desde la prehistoria hacia la historia.

Presumiblemente, los simbolismos lógico-matemáticos resultaron de una estilización de los simbolismos lingüísticos. Tobias Dantzig, señala que

la aritmética primitiva adoptó un sistema ternario de numeración cuyas cantidades eran: “uno”, “dos” y “mucho” (idiomas como el español y el francés retienen como recuerdos filológicos de esta numeración atávica a palabras como “tres”, “trans” o “très”). Las operaciones de la lógica que nuestra cultura adopta hoy en día, fueron enunciadas por un conjunto de pensadores griegos en el siglo IV a.C. El lógico polaco Jan Lukasiewicz, en un célebre trabajo publicado en 1934, estudió la genealogía de las operaciones lógico-matemáticas que forman parte de los procedimientos de demostración de la matemática contemporánea. Entre los precursores fundamentales se destacan Aristóteles, Filón de Megara y Diodoro Cronos. Las técnicas lógicas de demostración ya son utilizadas en los *Elementos* de Euclides, que compila el saber geométrico de la época, y que fue redactada por el año 300 a.C.

5. Fronteras de la cognición

> “*Un hermoso día, un muy hermoso día y que es la gloria del universo, uno de mis ancestros, un ser de la naturaleza, un miembro de la especie animal, decidió el cisma, decidió, ridículamente, parado sobre sus dos piernas velludas y todavía torcidas, que él no quería más ser de la naturaleza y obedecer a sus leyes*”. Albert Cohen

Junto a una sostenida evolución científico-tecnológica, emerge un vacilante proceso de normatización de la conducta humana, basado sobre todo en grandes sistemas religiosos y en la codificación de obligaciones y derechos. La epopeya cognitiva de la especie humana llevó a aumentar dramáticamente la esperanza de vida de los humanos, y la ciencia y la tecnología mostraron su maravillosa potencialidad para mejorar la calidad de vida de los individuos. Aunque también es posible que esta misma epopeya cognitiva contribuya a la destrucción de la biosfera y a nuestra propia extinción.

Pero nadie puede dudar que nuestra singularidad como humanos reside en nuestras construcciones culturales. Así, es parte de esa singularidad crear un sistema legal que rija el comportamiento de los integrantes de una comunidad, o crear una medicina que haga vivir sanas y activas a personas que sin ella, libradas a las crudezas de la “espontaneidad” biológica, morirían tras duros tormentos. El ser humano inventó la artificialidad e incorporó a la na-

turaleza obras “antinaturales”, como el derecho, la política, la literatura, la ingeniería o la medicina.

Alfred Lotka consideraba que tanto la lógica como la ética eran construcciones biológicas ligadas a nuestra supervivencia como animales. Él sostenía que la lógica es una normativa que propende a generar un pensamiento realista y decía que *“el razonamiento es el ejercicio de la imaginación constructiva dentro de los límites prescritos por la lógica”*. De modo simétrico, para Lotka la ética es una normativa de la conducta.

Las fronteras potenciales de nuestro conocimiento pueden estar condicionadas de forma compleja por la existencia de limitaciones intrínsecas en nuestra racionalidad. Planteemos nuevamente un problema clásico: ¿En qué medida los marcos lógico-matemáticos en los que se inscribe el razonamiento humano están condicionados por la dimensión de nuestro propio cerebro, y por las escalas de tiempo de los eventos electroquímicos neuronales? Si existiese un cerebro con un número de neuronas varios órdenes de magnitud superior al del nuestro, y diseñado bajo otros principios físicos de procesamiento de señales, ¿qué tipo de conceptualización de la realidad elaboraría? ¿Cuánto hay de universal y cuánto de contingente en nuestras estructuras lógico-matemáticas?

En nuestra época, el problema de la universalidad o la contingencia de las construcciones conceptuales, comienza a ser potencialmente accesible al análisis experimental mediante modelos neuromiméticos. En pocos años, poderosos computadores permitirán instalar sistemas de redes neuronales artificiales donde puedan excederse las escalas de tamaño y conectividad del cerebro humano, así cómo la velocidad de procesamiento de datos. Estos robots podrán ser instruidos (como pasa hoy con un niño), y además programados para explorar el ambiente y generar sus propias estructuras conceptuales. No es imposible que de este tipo de experimento surjan algunas respuestas sobre nuestros propios límites y que aparezcan sistemas conceptuales o marcos lógico-matemáticos alternativos

Pero aún siendo nuestro cerebro limitado, y nuestras capacidades acotadas, el hecho de integrar un colectivo cultural que es capaz de retener los éxitos parciales, puede seguir activando un proceso de evolución cultural y tecnológica protagonizada por individuos humanos, y donde cada individuo consiga desbordar sus propios límites. Esto es a la vez trivial y profundo. Es trivial señalar que nosotros podemos usar el cálculo diferencial e integral con naturalidad y que casi todos carecemos de la talla intelectual de Newton o Leibniz, pero es profundo que instalados en la cima de ese majestuoso edificio

que creó nuestra historia cultural, los humanos continuemos, tal como está ocurriendo hoy en día, haciendo crecer la altura de ese edificio.

6. Ejercicios

- Busque información actualizada sobre el origen y la evolución de los organismos unicelulares, así como estimaciones sobre el momento de aparición de los primeros organismos multicelulares.
- Evalúe la fracción del total de la historia de la vida en la Tierra exclusivamente ocupada por unicelulares.
- Busque datos sobre ancestros bacterianos de proteínas presentes en los vertebrados, utilizando información sobre filogenias moleculares.
- Infórmese sobre las diversas hipótesis sobre el origen del lenguaje humano, y algunos de los argumentos que las sustentan.

Referencias

Ashby, W. R. *Design for a Brain* (Second Edition), New York, Wiley, 1960.

Ashby, W. R. *An Introduction to Cybernetics,* New York, Wiley, 1956.

Ghysen, A. The origin and evolution of the nervous systems, *International Journal of Developmental Biology,* vol. 47: 555-562, 2003.

Gould S.J. La evolución de la vida en la Tierra, *Investigación y Ciencia*, diciembre 1994.

Leakey R. y Lewin R. *Nuestros Orígenes*, Barcelona, Crítica, 1994.

Levi Montalcini, R. *La Galaxia Mente*, Barcelona, Crítica, 2000.

Lotka, A. *Elements of Mathematical Biology*, New York, Dover, 1956.

Monod, J. *El Azar y la Necesiad*, Barcelona, Tusquets, 1988.

Mizraji, E. *El Segundo Secreto de la Vida*, Trilce, Montevideo, 1999.

Sagan, C. *Los Dragones del Edén,* Buenos Aires, Grijalbo, 1982.

Sagan, C. En defensa de los robots en *El Cerebro de Broca*, Barcelona, Grijalbo, 1981.

Sarnat H.B. y Netsky M.G. *Evolución del Sistema Nervioso*, Madrid, Blume, 1976.

Capítulo 14

Búsqueda de señales de actividad tecnológica en la galaxia

Guillermo A. Lemarchand

Resumen: en este trabajo se presenta un análisis de los fundamentos de los programas de búsqueda de señales artificiales de origen extraterrestre en la galaxia, que se han venido desarrollando por más de cinco décadas. Se muestra que el factor determinante para el éxito de estos proyectos de investigación, está dado principalmente por la vida media de una civilización tecnológica. Asumiendo el Principio de Mediocridad, se hacen estimaciones del mínimo número de civilizaciones que pudieran co-existir en la galaxia y de la probabilidad de encontrar alguna señal proveniente de ellas.

Abstract: In this article an analysis of the fundamentals used to search for extraterrestrial artificial signals in the galaxy, which have been developing for more than five decades, is presented. It is shown that the key factor for the success of these research projects is given by the technological civilizations lifetimes. Assuming the Principle of Mediocrity, estimations are made to determine the minimum number of civilizations that may co-exist in the galaxy and the probability of detecting a signal from them.

1. Introducción

Las primeras propuestas de diseñar metodologías de comunicación con seres de otros mundos comienzan en el siglo XIX (Lemarchand 1992). El 25 de marzo de 1822, el célebre matemático Karl F. Gauss (1777-1855) le envió

Guillermo A. Lemarchand (✉)

Consultor Regional del Programa de Ciencias Básicas e Ingeniería (2008-2010) de la Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe y Director del Proyecto SETI en el Instituto Argentino de Radioastronomía, C.C. 8 –Sucursal 25, C1425ZAB, Buenos Aires, Argentina

lemar@correo.uba.ar

Lemarchand, G.A. y Tancredi, G (eds.), Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, *Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería*, vol. 1, 319 - 347, © 2010 UNESCO-Montevideo.

una carta al astrónomo de Bremen, Wilhelm Olbers (1758-1840), mostrándole que con el uso de aproximadamente 100 espejos planos de un metro cuadrado cada uno, utilizados en conjunto, los humanos podrían llegar a comunicarse con los hipotéticos seres de la Luna. Luego agrega: *"si hiciéramos contacto con nuestros vecinos cósmicos, éste sería un descubrimiento mayor que el de América…"*

En forma independiente, Joseph von Littrow (1781-1840) director del Observatorio Astronómico de Viena, propuso cavar canales con formas de triángulos y círculos de decenas de kilómetros de diámetro, en el desierto de Sahara, para luego verter petróleo y encenderlos de noche. De esta manera, los habitantes del suelo selenita, podrían inferir que las luces con formas geométricas que aparecían en lado oscuro de la Tierra se debían a la presencia de seres inteligentes en su superficie.

En 1869, el inventor francés Charles Cros propone el uso de un sofisticado sistema de espejos parabólicos para enviar señales de luz hacia Marte. Años después, en 1891, una dama francesa devota de los escritos del astrónomo Camile Flammarion (1842-1925), organizó un concurso internacional, ofreciendo 100.000 francos, para el primer científico que hiciera contacto con habitantes de otro planeta o estrella antes de 1901. Marte estaba exceptuado de la lista porque se suponía que era trivial contactar a los marcianos.

En 1899, el famoso inventor Nikola Tesla (1856-1946), construyó en Colorado Springs, una bobina de 23 metros de diámetro, junto a una bola de cobre de un metro, colocadas en una torre de 60 metros de altura, con el objetivo de enviar señales eléctricas a los marcianos… Como resultado, todas las bombitas eléctricas titilaban a 40 km a la redonda de la torre.

En 1919, el premio Nobel de física Guillermo Marconi (1874-1937) afirmaba que las ondas de radio podrían ser utilizadas para establecer comunicaciones con inteligencias de otras estrellas. Consideraba que civilizaciones de planetas más antiguos que el nuestro podrían disponer de conocimientos muy valiosos para la humanidad de la Tierra. Poco más tarde anunciaría que desde su yate *Electra* había detectado señales radioeléctricas de los marcianos.

Albert Einstein (1879-1955), en una entrevista publicada por el periódico *The New York Times* (1920) llegó a afirmar que creía que Marte y otros planetas podrían estar habitados, pero que las señales de Marconi seguramente se debían a perturbaciones atmosféricas o a experimentos de otros sistemas inalámbricos. Luego agrega "Si otras inteligencias estuvieran intentando comunicarse con la Tierra, yo esperaría que utilicen rayos de luz, que son mucho más sencillos de controlar…"

Con los años, los astrónomos se encargarían de desmitificar la existencia de civilizaciones similares a la terrestre en el resto de los planetas del sistema solar. En 1959, dos físicos de la Universidad de Cornell, Giuseppe Cocconi (1914-2008) y Philip Morrison (1915-2005) publican un trabajo en la célebre revista científica *Nature* donde postulan la utilización de la radioatronomía como herramienta para detectar comunicaciones interestelares originadas en otras civilizaciones de la galaxia. En forma independiente, Frank D. Drake, un radioastronómo del Observatorio Nacional de Radio Astronomía (NRAO) en Green Bank se encontraba poniendo a punto su equipo para buscar este tipo de señales alrededor de dos estrellas cercanas, Tau Ceti y Epsilon Eridani. Hace cincuenta años, este grupo de pioneros comenzaba una tarea que se prolonga hasta nuestros días: detectar las primeras evidencias de que existen otras civilizaciones tecnológicas en nuestra galaxia.

2. Fundamentos de la búsqueda radioastronómica de civilizaciones extraterrestres

Por definición, una civilización tecnológica tiene la capacidad técnica para comunicar o generar cualquier tipo de actividad tecnológica que pueda ser detectable a distancias interestelares. Las señales así generadas, pueden ser intencionales (señales transmitidas para darse a conocer) o no intencionales (generadas como resultado de una actividad tecnológica de propósito local). Cualquier señal de contacto entre dos civilizaciones tecnológicas de nuestra galaxia, está restringida por las leyes físicas que gobiernan el universo. Para ser detectable a distancias interestelares, la señal deberá: (1) requerir una cantidad de energía mínima que supere el ruido de fondo galáctico, (2) viajar tan rápido como sea posible, (3) ser fácil de generar, detectar y direccionar, (4) no debería ser absorbida por el medio interestelar, las atmósferas planetarias y sus ionósferas.

Cuando se analizan las restricciones que imponen las leyes de la naturaleza al establecimiento de comunicación entre dos puntos del universo separados por distancias interestelares, únicamente la radiación electromagnética de alguna frecuencia específica puede cumplir con los cuatro requerimientos anteriores.

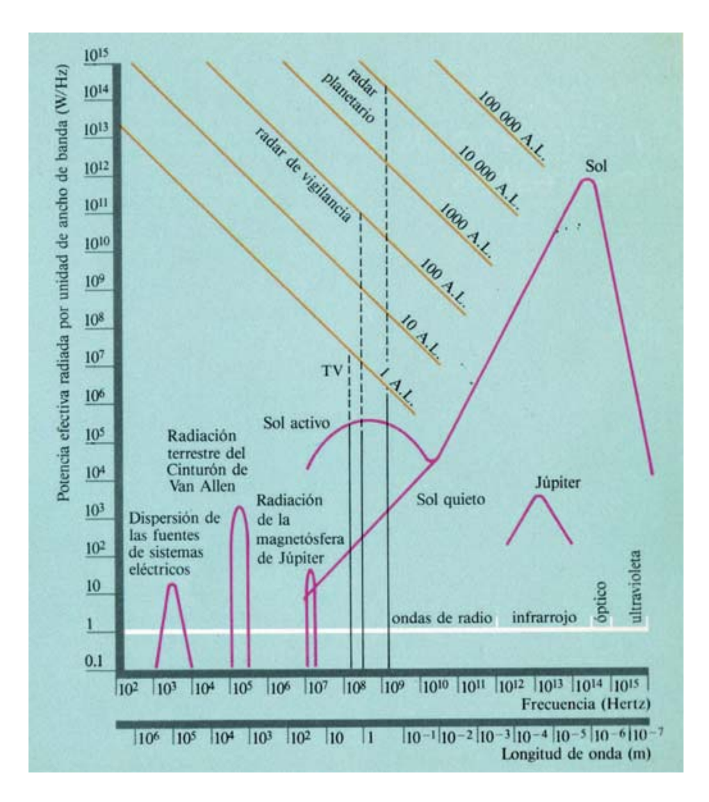


Fig. 1 - Diagrama indicativo de las potencias efectivas radiadas por diversas fuentes del sistema solar, expresadas en Watts por unidad de ancho de banda en función de la frecuencia y de la longitud de onda. Fuente: Colomb y Lemarchand (1989).

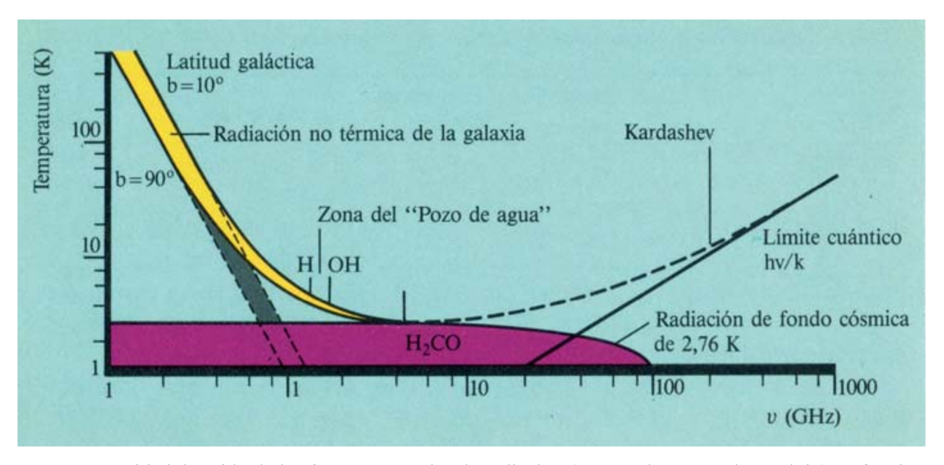


Fig.2 - Intensidad de ruido de las fuentes naturales de radiación (expresadas en grados Kelvin) en función de la frecuencia. Se representan algunos ejemplos de "frecuencias mágicas" sugeridas para la comunicación interestelar. Fuente: Colomb y Lemarchand (1989).

Para establecer qué región del espectro electromagnético sería la más adecuada para la comunicación interestelar se puede analizar el perfil de radiación de las fuentes naturales y artificiales de nuestro propio sistema solar. El Sol, Júpiter, los radares militares y planetarios, las emisoras de TV y FM, emiten en diferentes frecuencias y con distintas potencias. La Figura 1 presenta el espectro de emisión de las principales fuentes, que son, por otra parte, las que aquí nos interesa considerar. En el eje de las abscisas se representan las frecuencias y se indican las diversas regiones del espectro –ondas de radio, infrarrojo, luz visible, ultravioleta- así como también las longitudes de onda correspondientes a cada frecuencia. En el eje de las ordenadas se representan las potencias efectivas emitidas por unidad de ancho de banda. Las líneas oblicuas muestran las distancias máximas, en años luz, a las cuáles un instrumento de observación "extraterrestre" con una sensibilidad similar a la del Observatorio de Arecibo, estaría en condiciones de captar las emisiones enviadas desde el sistema solar con una frecuencia y potencia determinadas (Colomb y Lemarchand 1989).

Si se pretende establecer contacto con una civilización galáctica, se deberá buscar la manera de que la señal que se emite se haga evidente a la civilización receptora *(Principio Anticriptográfico)*. El análisis de la Figura 1 facilitará comprender qué región del espectro electromagnético y qué potencias deben elegirse para enviar señales artificiales que se distingan del ruido de fondo del sistema solar. Un criterio para reconocer si una señal es natural o artificial es el ancho de banda en el que se concentra la energía de la transmisión. Las fuentes naturales más estrechas que se conocen son los máseres cósmicos, que pueden concentrar la energía de su señal dentro de un ancho de banda de unos cuantos cientos de Hertz. Sin embargo, se pueden generar señales artificiales mucho más estrechas, hasta concentrarlas dentro de anchos de banda de 0,1 Hz que es el límite inferior que impone el centelleo del medio interestelar (Cordes et al. 1997). De esta manera, el principal criterio de artificialidad de una señal que provenga del cosmos estará caracterizado por su alto nivel de monocromaticidad.

La Figura 1 muestra cómo solo, dentro de la región de las microondas, las portadoras de señales de TV, los radares militares y las emisiones de los radares planetarios (Arecibo, Goldstone, Tidbimbila, etc.) tienen potencia suficiente como para ser detectados por otras civilizaciones tecnológicas de la galaxia. Con el objeto de analizar qué parte de esta región del espectro de microondas sería la más adecuada para la comunicación interestelar, en la Figura 2 se representa el espectro de emisión de ruido de fondo galáctico en

las frecuencias comprendidas entre 1 y 100 GHz. Además de la radiación de fondo cósmico que queda como remanente del Big Bang, para frecuencias menores a 1 GHz (10^9 Hz) existen fuentes de origen galáctico no térmico que son muy intensas. A frecuencias mayores que 100 GHz aparece el ruido cuántico, el fondo irreductible de intensidad creciente con la frecuencia que posee todo sistema receptor. Entonces, la región menos ruidosa para establecer un diálogo interestelar, está comprendida entre 1 y 100 GHz. Ha de observarse que si se quisiera explorar toda esta parte del espectro electromagnético con una resolución de 0,1 Hz, se necesitaría un analizador espectral de 10^{12} canales distintos.

Buscando criterios racionales para acotar el problema de esta investigación, a lo largo de los años se fueron proponiendo un conjunto de frecuencias con características especiales, que toda civilización tecnológica que estudiara el universo físico que nos rodea, tarde o temprano, las descubriría. A estas firmas espectrales se las denominó como "frecuencias mágicas" (Lemarchand 1992). La Figura 2 muestra la posición dentro del dial cósmico de muchas de ellas.

Con el avance de las tecnologías de procesamiento de datos, observatorios como el *Arreglo de Radio Telescopios Allen* (ATA), cuentan con la capacidad de analizar simultáneamente todas las frecuencias comprendidas entre 0,4 y 12 GHz, con una resolución espectral del orden del Hz.

La Figura 3 muestra un esquema simplificado de los parámetros a ser considerados, para diseñar una búsqueda radioastronómica de señales artificiales extraterrestres. En lo que sigue, se presentan las relaciones matemáticas a ser utilizadas para determinar las características de transmisión y recepción que deberán reunir los equipos para establecer la comunicación interestelar.

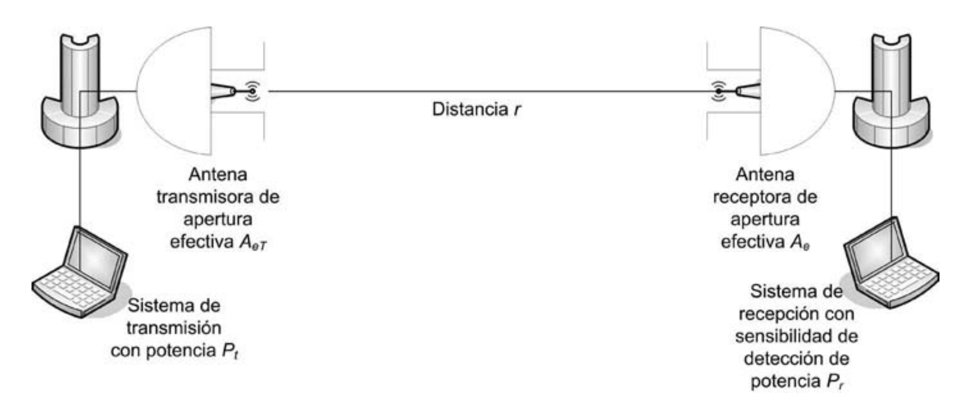


Fig. 3 - Esquema que representa los principales parámetros a tener en cuenta para la comunicación interestelar. Fuente: esquema del autor.

Asumiendo que una hipotética civilización extraterrestre emplea un radio transmisor que emite isotrópica y homogéneamente señales al espacio, con una potencia P_t dentro de un ancho de banda B_t, entonces generaría a una distancia r una densidad de flujo $P_t/B_t 4\pi r^2$. Una antena receptora de apertura efectiva A_e a una distancia r podría detectar las señales con un nivel de potencia en Watts [W] equivalente a:

$$P_r = \frac{B_r P_t A_e}{B_t 4\pi r^2}$$

donde: B_r = resolución espectral del receptor [Hz]
P_t = potencia de transmisión [W]
A_e = apertura efectiva de la antena receptora [m^2]
B_t = ancho de banda de la señal transmitida [Hz]
r = distancia entre el transmisor y receptor, [m]

Aquí se asume que $B_r \leq B_t$. Si se considera que la antena transmisora tiene una directividad D, la potencia recibida se transforma entonces en:

$$P_t = D\frac{B_r P_t A_e}{B_t 4\pi r^2} = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}\frac{P_t A_e B_r}{4\pi r^2 B_t} = \frac{P_t A_e A_{eT} B_r}{r^2 \lambda^2 B_t} \quad [W]$$

Donde λ es la longitud de onda expresada en metros y A_{eT} es la apertura de la antena transmisora en metros cuadrados.

En toda comunicación es importante considerar el cociente entre las potencias de las señales y las del ruido de fondo (SNR). Teniendo en cuenta que la potencia del ruido de fondo es descripta por la relación de Nyquist:

$$P_n = k\, T_{sis} B_r \qquad [W]$$

donde: k es la constante de Boltzmann = 1,38 x 10^{-23} [J K^{-1}],
T_{sis} = es la temperatura del sistema receptor [K] y
B_r = la resolución espectral del receptor.

Si se hace el cociente entre P_r/P_n se obtiene la siguiente expresión adimensional:

$$\frac{P_r}{P_n} = \frac{P_t A_{eT} A_e B_r}{k T_{sis} B_r r^2 \lambda^2 B_t}$$

La potencia del ruido disminuye aumentando el tiempo de integración *t* en una proporción $(B_r \times t)^{0,5}$. De esta manera, la relación señal/ruido (SNR) se transforma en:

$$SNR = \frac{P_t}{P_n/\sqrt{B_r t}} = \frac{P_t A_{eT} A_e \sqrt{B_r t}}{k T_{sis} r^2 \lambda^2 B_t}$$

Si se asume que $B_t = B_r$ (ancho de banda de transmisión igual a la resolución en frecuencia de la recepción) y que $B_r t = 1$ (la duración del pulso se corresponde con la resolución en frecuencia) es posible representar la relación SNR como:

$$SNR = \frac{P_t A_{eT} A_e}{k T_{sis} r^2 \lambda^2 B_r}$$

De allí se puede despejar *r* (distancia entre transmisor y receptor) como:

$$r = \sqrt{\frac{P_t A_{eT} A_e}{SNR\ k T_{sis} \lambda^2 B_r}} \ \text{[m]}$$

Aquí se está asumiendo que hay coincidencia entre los sistemas trasmisores y receptores en la dirección del haz de ambas antenas, frecuencia, anchos de banda y polarización de las ondas electromagnéticas utilizadas.

Recuadro: Un ejemplo de cómo calcular los parámetros para la comunicación interestelar

Ejemplo:
Asumamos que una hipotética civilización extraterrestre se encuentra transmitiendo 10^6 Wm^{-2}, en forma de pulsos de 10 segundos de duración, utilizando ondas polarizadas circularmente hacia la derecha, empleando una antena de 100 m de diámetro y una frecuencia $\nu = 5$ GHz. Además se considera un sistema receptor terrestre que cuenta, también, con una antena de 100 m de diámetro, un receptor que tiene una $T_{sis} = 10$ K y un analizador espectral que dispone de una resolución máxima de $B_r = 0,1$ Hz. Para facilitar los cálculos se considera que tanto la antena transmisora como la receptora, tienen un 50% de eficiencia en sus respectivas aperturas y que el sistema receptor es capaz de reconocer la señal con un SNR=3. Determinar a qué distancia se podría encontrar la civilización extraterrestre para que el sistema local la detecte.

Solución:
Las aperturas efectivas de las antenas estarán dadas por

$$A_e = A_{eT} = 0{,}5\pi \frac{d^2}{4} = 4000\ [\mathrm{m}^2]\ \ (d = \text{diámetro de la antena})$$

La longitud de onda estará dada como:

$$\lambda = (c/\nu) = (2{,}997924562 \times 10^8\ \mathrm{m\ s^{-1}} / 5\ 10^9\ \mathrm{s^{-1}}) = 0{,}05995849\ [\mathrm{m}]$$

Entonces:

$$r = \sqrt{\frac{10^6 \times 4000^2}{3 \times 1{,}38 \times 10^{-23} \times (0{,}05995849)^2 \times 0{,}1}} \cong 10^{19}\ [\mathrm{m}]$$

Considerando que 1 año luz es aproximadamente 10^{16} m, se deduce que la distancia a la cual estas dos civilizaciones podrían comunicarse estaría dada por

$$r \cong \frac{10^{19}}{10^{16}} = 1000\ [\text{años luz}]$$

Para facilitar la discusión se debe profundizar acerca de las implicancias de los valores encontrados en el ejemplo del recuadro. Se puede asumir con bastante precisión, que la densidad de estrellas en un radio de 1000 años luz alrededor del Sol es aproximadamente uniforme, y tiene un valor de 0,01 estrellas por año-luz cúbico. De aquí se infiere que dentro de un volumen esférico de radio 1000 AL, se pueden llegar a encontrar aproximadamente unas $N_e = 4 \times 10^7$ estrellas. Para las antenas del ejemplo:

$$D = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi \times 4000}{(0{,}05995849)^2} \cong 1{,}4 \times 10^7$$

Por lo tanto, el número máximo de objetos que la antena podría observar es de $\tilde{N} = D = 1{,}4 \times 10^7$. Entonces, como se asumió una densidad constante, en cualquier dirección del cielo una antena de 100 m, siempre tendrá dentro de su haz la siguiente cantidad aproximada de estrellas:

$$\frac{N_e}{D} = \frac{4 \times 10^7}{1{,}4 \times 10^7} \cong 3$$

Aumentando la capacidad de procesamiento de la información recogida, se podría identificar señales artificiales con una relación señal-ruido de SNR = 1, esto implicaría que el rango de distancia desde la cual se detectaría la señal crecería un factor $3^{1/2}$. De esta manera, la cantidad total de estrellas a ser observadas se incrementaría con el cubo de la cantidad anterior, de lo que se deduce que el número de estrellas dentro del haz de la antena en toda dirección sería de aproximadamente 16 estrellas.

Por otra parte, si la densidad de estrellas o la intensidad de la transmisión fuesen menores, el número de estrellas dentro de cada haz de la antena receptora sería substancialmente menor. En este caso, la estrategia de apuntar solo a estrellas cercanas en direcciones fijas, sería mucho más eficiente que la de utilizar la misma antena para hacer un relevamiento de todo el cielo.

3. Las dimensiones del pajar cósmico

Los primeros trabajos detallados en donde se analiza el papel de los distintos parámetros libres involucrados en el diseño de una estrategia de observación comprehensiva, comienzan con el estudio de la NASA conocido como *Proyecto Cíclope*, que data de principios de la década del setenta (Billingham y Oliver, 1971). Un década más tarde, se desarrolló un segundo estudio de este tipo, también dentro del ámbito de la NASA (Drake et al. 1983). Finalmente, en el 2002, el *SETI Institute* desarrolló un trabajo donde establece una estrategia de desarrollo tecnológico para la detección de señales artificiales extraterrestres hasta el 2020 (Ekers et al 2002).

Asumiendo que las ondas electromagnéticas de una determinada frecuencia se constituyen en el canal de comunicación óptimo entre dos civilizaciones galácticas, que no tienen comunicación previa entre sí, se puede presentar las diversas variables desconocidas dentro de un espacio de configuración de doce dimensiones distintas (Lemarchand 1994a). La Tabla 1 presenta una síntesis del mismo. El diseño de cualquier mensaje interestelar deberá contemplar cada una de estas dimensiones y la estrategia de búsqueda, a su vez, deberá estar adecuada a las restricciones que imponen las incertezas de cada dimensión y las limitaciones del estado del arte de las tecnologías disponibles.

Con el advenimiento de los láseres de potencia que pueden concentrar altos niveles de energía en fracciones temporales del nanosegundo, se abrieron nuevos caminos teóricos y observaciones para el desarrollo de la búsqueda de señales artificiales de origen extraterrestre en el rango óptico del espectro electromagnético (Lemarchand et al. 1993 y Lemarchand 1997). Se han desarrollado técnicas especiales para detectar este tipo de señales y procesar los 10^{10} bits de información que llegan en cada segundo de observación. Algunas de ellas fueron empleadas en la observación de estrellas cercanas (Howard et al 2004). Por otra parte, liderado por Paul Horowitz de la Universidad de Harvard, se está desarrollando desde 2004, un programa de búsqueda en todo el cielo de pulsos ópticos de nanosegundos de duración (Howard et al 2003).

Tabla 1. Dimensiones del espacio de configuración de las variables involucradas en la detección de señales electromagnéticas provenientes de otra civilización. Fuente: Elaboración del autor basado en Lemarchand (1994a).

Tipo de Dimensión	**Propiedades y características de las señales**	**Restricciones**
Dimensiones de información	$\Delta\nu$ = cubrimiento en frecuencia	Los límites tecnológicos presentes permiten relevar simultáneamente todas las frecuencias entre 0,4 y 12 GHz (por ejemplo ATA)
	ΔB = resolución espectral	Los límites impuestos por el fenómeno de centelleo interestelar, restringen las señales a anchos mínimos de 0.05 a 1 Hz
	p = polarización	No existen restricciones tecnológicas para contemplar simultáneamente todas las polarizaciones posibles.
	M = tipo de modulación	Se pueden analizar señales continuas, señales que derivan en frecuencia, pulsos, etc.
	τ = tasa de transmisión de la información	*Media* → Radio SETI ~10^{-3} s *Alta* → SETI óptico ~10^{-8} s
	T = ciclo de trabajo de transmisión	Muy importante para la validación de los protocolos de detección. Se necesitan ciclos largos para permitir la verificación de la detección por observatorios independientes. Ciclos cortos de transmisión serían muy difíciles de corroborar.
Dimensiones espaciales	α = coordenadas de ascensión recta	Se siguen dos estrategias: relevamientos totales del cielo y observación de estrellas fijas
	δ = coordenadas de declinación	
	r = distancia radial y sus dimensiones asociadas: • P_t = potencia de transmisión • P_r = sensibilidad del equipo • A_e = área colectora • SNR	Desde ~ 40 años, Arecibo mantiene la máxima sensibilidad para búsquedas de radio SETI Desde ~ 10 años, se dispone de telescopios ópticos de 10-m pero solo se han usado telescopios de 2-m para SETI óptico *Futuro*: SKA – OSETI espacial
	t = sincronización	Se debe apuntar el receptor a una dirección del cielo en el exacto momento en que la señal esté pasando por la Tierra. Se debe sincronizar el momento adecuado con el lugar adecuado en el cielo. *Futuro*: antenas omni-direccionales
Dimensiones criptográficas	C = código	Se asume el *"Principio anti criptográfico"*
	S = semántica	Es muy difícil de estimar *a priori*. Como contra-ejemplo: asumiendo que realmente fue escrito con un código, aun no se pudo decodificar el *"Manuscrito Voynich"* atribuido a Roger Bacon (1214-1292)

Tarter (2001) presenta una revisión de las características de los distintos programas observaciones de SETI en el mundo. Desde la Argentina se realizó por primera vez un relevamiento total del cielo del hemisferio sur, utilizando una de las dos antenas de 30 m del Instituto Argentino de Radioastronomía (ver Figura 4). El sistema utilizaba un analizador espectral de 8,4 millones de canales de 0,05 Hz de resolución espectral. Las observaciones se realizaron alrededor de distintas frecuencias mágicas, con resultados negativos (Lemarchand 1998a).

Durante los últimos cincuenta años, se han propuesto distintas estrategias alternativas para justificar ingeniosamente –haciendo uso del conocimiento de las leyes que regulan la naturaleza- distintas restricciones para reducir el número de parámetros libres. Se han propuesto diversas frecuencias mágicas (Lemarchand 1992, 1998b), restricciones a los anchos de banda posibles en el medio interestelar (Cordes et al. 1997), distintas estrategias observacionales (Tarter 2001), formas de sincronizar las transmisiones y recepciones de las señales (Lemarchand 1994b), nuevas alternativas en el procesamiento de los datos (Ekers et al. 2002) y recientemente se ha comenzado a discutir aspectos acerca de la universalidad de los mapas cognitivos para ser utilizados en el diseño de la codificación y semántica de los mensajes interestelares (Lemarchand y Lomberg, 2009).



Fig. 4 - El Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR) dependiente del Conicet, dispone de dos antenas de 30 m y puede operar en diversas frecuencias entre 1,4 y 5 GHz. La antena 2 fue utilizada regularmente para hacer el relevamiento de todo el cielo del hemisferio sur, buscado señales de origen artificial con una resolución espectral de 0,05 Hz y una sensibilidad de 10^{-24} Wm^{-2} . Foto: G.A. Lemarchand.

Tabla 2. listado de distintas propuestas realizadas en la literatura científica para encontrar evidencias de actividades tecnológicas en la galaxia. Fuente: Lemarchand (2000a) en donde se encuentra el listado completo de las referencias (*) originales, otros ejemplos se pueden encontrar en Lemarchand (1994b).

Sistema portador de información	Efecto Observacional	Referencias (*)
Ondas de radio	Intercepción de comunicaciones entre naves espaciales interestelares	Vallée y Simard-Normandin (1981)
Radiación infrarroja	Detección de "Esferas de Dyson" en 10 µm	Dyson (1959, 1966) Jogaku y Nishimura (2000) Slysh (1985)
Radiación óptica	Descubrimiento de elementos exóticos en las líneas espectrales de las estrellas (por ej. el tecnecio)	Drake (1964)
	Descubrimiento de tecnecio, plutonio, praseodimio, etc. como consecuencias de actividades artificiales de nucleosíntesis, para cambiar las propiedades espectrales de la estrella. Por ejemplo al usar a la estrella como repositorio de los residuos generados por la actividad nuclear en el planeta	Whitmire y Wright (1980)
Rayos X	Si se usara una explosión simultánea en el espacio con todo el arsenal nuclear disponible en la Tierra, la misma generaría un pulso omnidireccional de rayos X que sería detectable a 200 años luz de distancia.	Elliot (1973) Fabian (1977)
	Secuencias de flashes de rayos X como consecuencia de arrojar material sobre las estrellas de neutrones.	Corbet (1997)
	Uso de binarias de rayos X como señales de alerta	
Rayos γ	Observaciones astronómicas de radiación γ que presente comportamiento anómalo y que se lo interprete como resultado de la aniquilación de materia y antimateria para su uso como propulsor de sistemas de navegación interestelar	Harris (1986, 1991) Viewing et al (1977) Zubrin (1996)
Neutrinos	Detección de haces artificiales de neutrinos usados para la comunicación interestelar	Learned et al (1994) Pasachoff y Kutner (1979) Saenz et al (1977) Subotowicz (1979) Überall et al (1979)
Intercambio de Materia	Utilización de codificación de mensajes en sustancias que puedan almacenar información dentro de un código genético de virus o bacterias que puedan sobrevivir por millones de años a los viajes interestelares	Nakamura (1986) Yokoo y Oshima (1979)
Técnicas directas	Pequeñas naves sondas espaciales interestelares que generen ecos de nuestras transmisiones de radio	Bracewell (1960, 1975) Freitas y Valdes (1980, 1985)
	Búsqueda de objetos artificiales de origen extraterrestre dentro del sistema solar.	Papagiannis (1978, 1985)
	Objetos de origen extraterrestre camuflados en el cinturón de asteroides	Tipler (1980)
	Máquinas de von Neumann	
Exótica	Viajes por agujeros de gusanos, teleportación de estados cuánticos, utilización de leyes de la naturaleza aún desconocidas	Literatura de ciencia ficción

Cuando se consideran todas las dimensiones posibles del espacio de configuración presentado en la Tabla 1, y se hacen las simplificaciones correspondientes al estado del arte de la tecnología observacional, se llega a la conclusión que las dimensiones a explorar forman un verdadero "pajar cósmico" de un tamaño equivalente a 10^{29} celdas distintas. Haciendo una analogía entre la búsqueda de señales de origen extraterrestre y la búsqueda de una aguja de coser en un pajar, fácilmente se podría corroborar que el problema de la búsqueda de evidencias de señales artificiales extraterrestres, es equivalente al problema de buscar una aguja de coser en un pajar, dentro de un volumen 35 veces el del planeta Tierra (Lemarchand 1998b). En cincuenta años de búsqueda, solo se ha explorado 10^{-14} veces ese espacio de configuración. Esto implica que estamos aún muy lejos de refutar o corroborar si estamos solos en el universo. La ausencia de evidencia no es evidencia de la ausencia.

Lemarchand (1992, 1994b) hizo una revisión de todas las metodologías alternativas, propuestas en la literatura científica, destinadas a encontrar evidencias de actividades tecnológicas en la galaxia. La siguiente Tabla 2 da cuenta de algunos ejemplos de ellas (Lemarchand 2000a). En todos estos análisis se ha descartado la posibilidad de viajes interestelares tripulados, merced a las grandes limitaciones, en términos de consumo de energía, que tales viajes implicarían (Lemarchand 1992, 2007a).

Posiblemente el primer descubrimiento de una evidencia de actividad tecnológica de origen extraterrestre, se manifieste mediante la detección astronómica de un fenómeno totalmente anómalo e inesperado, cuya única interpretación posible sea adjudicándole un origen artificial.

4. La vida media de las civilizaciones tecnológicas

Como se mostró en la Sección 2, el factor clave para el éxito del programa de investigación sobre búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI) es la densidad de civilizaciones tecnológicas en la galaxia. Una densidad baja implica un fracaso prácticamente asegurado de los programas de búsqueda, mientras que una densidad alta aumenta considerablemente una posible detección utilizando la tecnología disponible en el presente.

En 1961, Frank Drake (Pearman 1963) propone una ecuación para estimar el número de civilizaciones tecnológicas en nuestra galaxia. A lo largo de los años se han asignado diferentes valores a los distintos factores de dicha *Ecuación de Drake*, en los cuáles se mostró que el número de civilizaciones

tecnológicas en al galaxia (N) es fuertemente dependiente de su último factor *L*, o la vida media de una civilización tecnológica en años (Kreifeldt 1973, Oliver 1975).

El *Principio de Mediocridad* propone que la Tierra y la vida en ella no ocupan ningún lugar especial en el universo. Nuestro sistema planetario, la vida en la Tierra y nuestra civilización tecnológica sería una consecuencia lógica de la evolución biológica en un ambiente adecuado, que resulta de un proceso de miles de millones de años de evolución y selección natural (Hoerner, 1961). En otras palabras, cualquier cosa particular para nosotros tendrá, probablemente, un valor promedio en comparación con otros lugares del universo.

Varios estudios biológicos y ecológicos de muy largo plazo, han demostrado que las diferentes especies en la Tierra, surgen, se desarrollan y se extinguen con similares patrones evolutivos (Charnov 1993, Gurney y Nisbet 1998). La especie humana no puede ser una excepción. El *Homo sapiens* ha roto la "ley" ecológica que establece que los animales grandes, depredadores son raros. En particular, dos innovaciones fundamentales, han permitido a nuestra especie alterar las reglas de la vida en el planeta y permitir así una expansión sin precedentes de la especie: el habla (lo que implica la transmisión instantánea de un rango de composición abierta de pensamientos conscientes) y la agricultura (que hace el mundo pueda producir alimentos en niveles muy superiores a los naturales). Sin embargo, la selección natural no ha dotado al ser humano de un sentido de auto-preservación a largo plazo.

En base a trabajos anteriores (Lemarchand 2000b, 2004, 2006, 2009), aquí se mostrará que los seres humanos se enfrentan a un nuevo tipo de macrotransición: la tecnológica. Lemarchand (2004) definió la *Edad de Adolescencia Tecnológica* (TAA) como la etapa en la que una especie inteligente tiene la capacidad de auto-aniquilase totalmente debido a: (1) el uso de las tecnologías con objetivos auto-destructivos (por ejemplo, la guerra mundial, el terrorismo, etc.), (2) la degradación del medio ambiente del planeta de origen (por ejemplo, el cambio climático, la sobrepoblación, el aumento de las tasas de extinción de especies, etc.), o simplemente (3) por la mala distribución de los recursos físicos, educativos y económicos (diferencia en el nivel de desarrollo entre las sociedades desarrolladas y en camino a desarrollarse). Este último factor podría causar el colapso de la civilización debido a las tensiones generadas por las desigualdades entre las diferentes fracciones de la sociedad global.

Aquí se presenta un enfoque semi-empírico para estimar el periodo de tiempo que se puede extender esta nueva macro-transición societal. Un estudio sistemático de los indicadores pertinentes de comportamiento a largo plazo de nuestra civilización tecnológica es útil, no sólo para hacer una estimación del posible valor de L, sino también para identificar cuáles son las variables que necesitan más atención para mejorar y cambiar, a fin de optimizar la expectativa de vida media de la civilización terrestre actual. La comprensión de la dinámica de evolución de estos patrones sociales de largo plazo nos puede ayudar a diseñar diferentes estrategias para evitar la auto-aniquilación.

En un sentido amplio, asumiendo la universalidad del Principio de Mediocridad, la TAA podría ser considerada como el cuello de botella en la evolución de cualquier civilización tecnológica en la galaxia. Una fase en que la continuidad misma de la especie estará obligada a superar la tentación de extinguirse por el mal uso de sus fuerzas acrecentadas.

Aquí se proponen las siguientes tesis: (1) La "etapa de adolescencia tecnológica" debería ser considerada como una transición de fase societal, similar a la ocurrida luego de la invención de la agricultura y el establecimiento de las ciudades (origen de las civilizaciones), (2) Esta "transición" podría ser corroborada o refutada analizando un conjunto de indicadores societales de muy largo plazo, (3) El análisis del comportamiento de la evolución temporal de los distintos indicadores contemplados, podría ser utilizado para estimar la duración de la etapa de adolescencia tecnológica, y (4) El lapso de transición de la adolescencia tecnológica establecería un umbral mínimo de vida media de una civilización tecnológica.

En esta sección se presentan, a modo de ejemplo, algunos de los resultados obtenidos en los trabajos anteriores (Lemarchand, 2004, 2006, 2009).

Se analiza la evolución temporal de una serie de indicadores sociales para entender las constantes de tiempo en las que las sociedades se organizan con el fin de producir cambios en un nivel de macro-comportamiento. Desde la invención de armas de destrucción masiva (por ejemplo, armas nucleares, químicas, biológicas, etc.) por primera vez en la historia evolutiva, la humanidad cuenta con la tecnología como para causar la extinción total de la especie. La enorme inversión en las tareas de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación, con aplicaciones militares y de defensa (aproximadamente 150 mil millones de dólares anuales en tareas de I+D militar) ha generado un crecimiento exponencial en el coeficiente de letalidad del armamento (Figura 5).

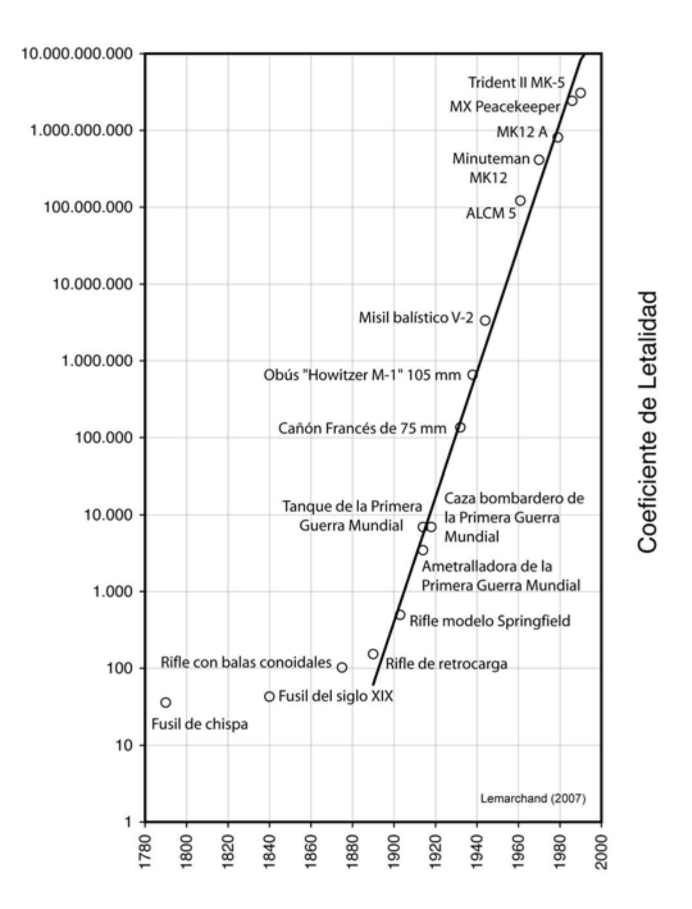


Fig. 5 - Evolución del coeficiente de letalidad del armamento disponible en función del tiempo. El gráfico está en escala semilogarítmica. El eje de las ordenadas mide número máximo de muertes que un dado armamento genera después de una hora de uso. Fuente: Lemarchand (2007b).

El coeficiente de letalidad mide el máximo número de víctimas por la hora que un arma puede generar, teniendo en cuenta: la velocidad de disparo, el número de objetivos, la eficacia relativa, los efectos de alcance, precisión, fiabilidad, etc. La Figura 5 muestra que la tasa de crecimiento del coeficiente de letalidad ha aumentado en un factor de 60 millones durante los últimos 100 años o 600.000 por año. Este hecho implica que desde hace unas décadas la humanidad dispone ya de capacidad tecnológica para aniquilar completamente nuestra civilización en un corto período de tiempo.

La Figura 6 muestra la distribución del armamento nuclear mundial desde 1945 al presente. En el año 1986 se llegó a tener 70.586 ojivas nucleares

desplegadas en el mundo. En la actualidad (veinte años después de la caída del Muro de Berlín) todavía existen 23.360 ojivas emplazadas, que equivalen a casi once veces el umbral mínimo de 2000 ojivas (según los modelos originales de la década del ochenta) necesario para desatar una catástrofe climática global, conocida como *invierno nuclear*. Las consecuencias de un invierno nuclear serían similares a los efectos climáticos que se generarían si impactará un cometa de algunos cientos de km de diámetro sobre la superficie terrestre. La humanidad y gran parte de las especies se extinguirían de la faz de la Tierra de la misma manera que los dinosaurios, hace más de 65 millones de años atrás.

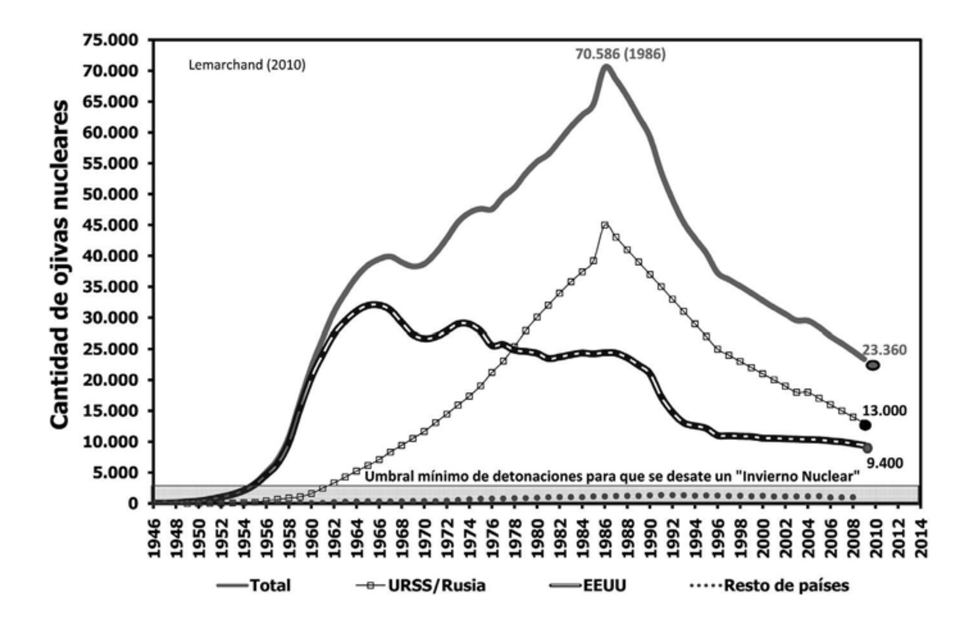


Fig. 6 - Evolución de la distribución de ojivas nucleares existentes en el planeta (1946-2009). Fuente: Lemarchand (2010)

Recientes estudios desarrollados por Toon et al (2008) y Mills et al (2008) con modelos de la atmósfera terrestre más realistas que los originales del ochenta, demostraron que una pequeña guerra regional que use apenas un centenar de ojivas nucleares, podría generar también una catástrofe global. Asumiendo estos nuevos umbrales, actualmente la humanidad del planeta tiene desplegadas “230 veces más ojivas nucleares” que las necesarias para desatar un invierno nuclear global.

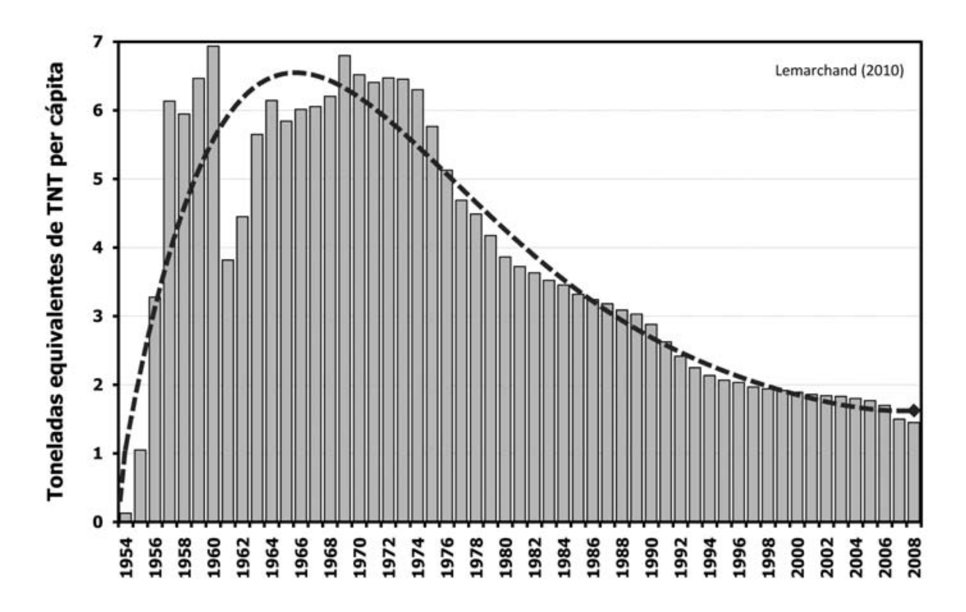


Fig. 7 - Evolución de la capacidad destructiva equivalente del armamento nuclear desplegado por año dividido el valor la población mundial anual (1954-2008). Fuente: Lemarchand (2010).

Por otra parte, Sullivan et al (1978), mostraron que las transmisiones de radio terrestres han aumentado la intensidad de sus transmisiones de radio entre 1945 y 1980, por lo menos entre 4 y 5 órdenes de magnitud. También mostraron cómo las señales terrestres podrían ser fácilmente detectadas por las eventuales civilizaciones tecnológicas cercanas. Por ejemplo, los Sistemas de Radar de Alerta Temprana, relevan constantemente todo el cielo con potentes transmisores. Las últimas son las más señales, que se escapan al espacio exterior, más intensas generadas por la humanidad, con excepción de las transmisiones de los radares planetarios (por ejemplo, Arecibo, DSN, etc.).

Es interesante observar que nuestra especie alcanzó el nivel de ser detectada por otra civilización tecnológica galáctica al mismo tiempo, que la humanidad alcanzó la capacidad tecnológica de auto-aniquilación.

En trabajos anteriores (Lemarchand 2004, 2006) ha representado la distribución del número de batallas en función de su intensidad (medida como la fracción de muertes generadas sobre el total de participantes). Cuando se analizaron estas distribuciones normalizando el factor de las tecnologías involucradas, se encontró una alta correlación entre el coeficiente de letalidad y la pendiente de la distribución de las fatalidades en las guerras. Un análisis ex-

haustivo muestra que estas distribuciones siguen muy bien el comportamiento de los sistemas de criticalidad auto-organizada (SOC).

Los resultados obtenidos siguen leyes de potencia con una pendiente muy similar a la encontrada por Clauset et al. (2007), en sus análisis de la frecuencia de graves atentados terroristas en todo el mundo entre 1968 y 2006. Ambos estudios, se refieren a la dinámica de las muertes generadas por la violencia intra-humana y su combinación contempla desde los asesinatos de unos pocos individuos, a la muerte decenas de millones de personas en las guerras. De alguna manera, esto muestra que la dinámica de la violencia entre los humanos se rige por el mismo tipo de procesos observados en una gran variedad de otros sistemas complejos, que tienen la propiedad de criticalidad auto-organizada (Jensen, 1998). Los estudios sobre la distribución de las guerras ocurridas en los últimos 500 años y su combinación con los datos de los niveles de frecuencia de los ataques terroristas, muestran que la violencia letal entre los seres humanos sigue un comportamiento similar a la dinámica de criticalidad auto-organizada. Con los datos mencionados, el modelo SOC predice la posibilidad de tener un evento en el que toda la población mundial se aniquile dentro de los próximos cientos de años.

Debido a la complejidad, la fiabilidad y el envejecimiento de los sistemas de alerta temprana, las tasas de falsas alarmas de un ataque nuclear han sido siempre relativamente altas. Por lo general, se cree que durante una gran crisis internacional no habría tiempo suficiente para distinguir entre las falsas alarmas y un alerta real de un ataque enemigo. Los datos históricos disponibles sugieren que al menos una falsa alarma lo suficientemente grave como para provocar un ataque nuclear estratégico, sería producida con un 50% de probabilidad durante el tiempo de una crisis internacional larga (Wallace et al. 1986).

Por último, la Figura 8 muestra la evolución anual de los gastos militares mundiales (1950-2008), expresada en miles de millones de dólares constantes de 2009. Para intentar dar significado a esta enorme cantidad de dinero, se la puede comparar con el presupuesto global utilizado anualmente en la exploración espacial (que combina el presupuesto anual de todas las agencias espaciales nacionales e internacionales del mundo). Los gastos espaciales mundiales solo representan menos del 3,5% del gasto militar mundial anual.

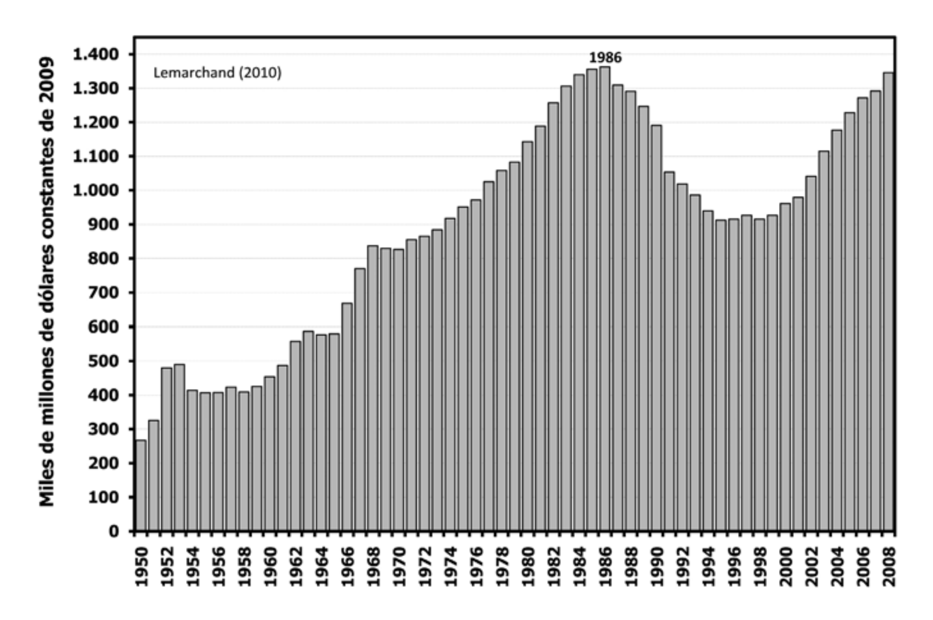


Fig. 8 - Evolución de los gastos militares mundiales (1950-2008) expresados en dólares constantes del año 2009. Fuente: Lemarchand (2010).

Las Naciones Unidas identificaron las áreas prioritarias mundiales que deben ser atendidas para eliminar del mundo las necesidades básicas insatisfechas, la exclusión social, las desigualdades, el cuidado del medio ambiente y el planeta, la necesidad de garantizar la educación básica, entre otros. El programa establecido por los Estados Miembros se engloba dentro de los Objetivos del Milenio (ODM) de las Naciones Unidas. En la Tabla 3 se compara los gastos militares mundiales con el costo total mundial necesario para cumplir con todos los ODM.

La evolución a largo plazo de los indicadores sociales analizados (Lemarchand 2009), muestran una transición que comenzó tras la Segunda Guerra Mundial y que podría terminar en la segunda mitad del siglo XXI. En una primera aproximación, se estima que este período abarca casi 200 años, con un pico más acentuado entre 1985-2015. Los estudios de la dinámica poblacional y sus modelos (Kapitza 1996) muestran que el mundo está atravesando una transición demográfica similar a la que tuvo hace 12.000 años con la invención de la agricultura y las ciudades. La humanidad también está enfrentando una transición en los procesos democratización mundial, que se inició hace 200 años y persistiría por un lapso de 100 años más (Lemarchand 2006).

Tabla 3. El costo de alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas como porcentaje del gasto militar mundial. Fuente: Adaptado de Gillis (2009: 13) usando datos tomados de la gráfica 4 y de la publicación, The Costs of Attaining the Millenium Development Goals, The World Bank, Washington. Accesible en: http://www.worldbank.org/html/extdr/mdgassessment.pdf

Objetivo: Erradicar la pobreza extrema y el hambre para el 2015 Llevar a la mitad la proporción de personas que viven con menos de 1 dólar diario y sufren hambre **Costo:** USD 39.000 a 54.000 millones **Porcentaje del Gasto Militar Global:** 2,6% a 3,7%
Objetivo: Promover la educación universal y el equilibrio de género para el 2015 Alcanzar la educación universal y eliminar la disparidad de género en la educación **Costo:** USD 10.000 a 30.000 millones **Porcentaje del Gasto Militar Global:** 0,7% a 2,0%
Objetivo: Mejorar la salud para el 2015 Reducir en 2/3 la tasa de mortalidad infantil antes de los 5 años, reducir en 3 /4 la tasa de mortalidad materna y revertir la difusión del HIV/SIDA **Costo:** USD 20.000 a 25.000 millones **Porcentaje del Gasto Militar Global:** 1,4% a 1,7%
Objetivo: Medio ambiente sostenible para el 2015 Llevar a la mitad el número de personas sin acceso al agua potable, mejorar las condiciones de vida de más de 100 millones de personas que habitan en villas miserias **Costo:** USD 5.000 a 21.000 millones **Porcentaje del Gasto Militar Global:** 0,3% a 1,4%
Los gastos militares globales utilizados solo en el año 2008, equivalen a los costos totales de las Naciones Unidas durante 732 años de funcionamiento o a los de la UNESCO durante 4364 años…

Nota de la Tabla 3: La metodología utilizada por el Banco Mundial para estimar los costos de los Objetivos del Milenio, asume que –debido a la superposición de tareas- resulta muchísimo más económico agrupar distintos Objetivos del Milenio entre si y estimar el costo agregado de lograr dichas metas. Si se optara por estimar el costo en forma individual de cada uno de los 8 objetivos previstos en el programa, la suma total sería muy superior. Por esta razón, en esta tabla se presentan los costos de los objetivos en forma agregada, tal cual se presenta en la estimación del Banco Mundial.

De los datos analizados, se deduce que en términos evolutivos de largo plazo la dinámica poblacional humana (desde el *Homo sapiens* en adelante) muestra un crecimiento auto-similar siguiendo una ley de potencia. El modelo matemático desarrollado por Kapitza (1996) explica a la "transición demográfica actual" como una propiedad intrínseca del sistema. En este período de transición, toda perturbación (social, económica, militar, etc.), aun pequeña, será amplificada por el propio sistema a escala global. Esto determina un período en donde se favorece la *oportunidad* de que un pequeño evento violento adquiera rápidamente un alcance mundial.

Los estudios de distribución de muertes generadas por hechos violentos muestran, con datos que se extienden a lo largo de 7 órdenes de magnitud (desde las muertes individuales por ataques terroristas al número de fallecidos durante la Segunda Guerra Mundial) que la violencia intra-humana sigue una dinámica de criticalidad auto-organizada. Esta permite estimar la *probabilidad* de que ocurra un evento violento en el que toda la especie se auto-aniquile. Un fenómeno de estas características podría ocurrir durante los próximos siglos.

La tasa de crecimiento exponencial en el coeficiente de letalidad del armamento disponible, permite desde finales de la Segunda Guerra Mundial, que la humanidad disponga de la *tecnología necesaria* para asegurar su total extinción.

Un somero análisis de la inversión anual en gastos militares muestra el *excesivo financiamiento* que cuentan estas actividades, en comparación con las que reciben otras necesidades prioritarias de la humanidad.

Por lo tanto, se tiene la *oportunidad*, la *probabilidad,* la *tecnología* y el *financiamiento* para que ocurra un evento en el cual la humanidad se puede extinguir. Para simplificar el estudio no se ha mencionado en este análisis las consecuencias de la degradación ambiental, el cambio climático, las epidemias, etc.

La distribución de las series temporales analizadas, muestra que esta *Edad de Adolescencia Tecnológica* humana, se extiende por un período de L_{Min} = 200 años. Asumiendo que lo que ocurre aquí en la Tierra es esencialmente la media de lo que ocurre en el resto del universo (Principio de Mediocridad), se puede tomar este valor como un umbral mínimo.

5. El impacto del valor de vida media de las civilizaciones en el diseño de la búsqueda de señales artificiales de origen extraterrestre.

La Ecuación de Drake (Pearman, 1963) asume que el número de civilizaciones tecnológicas en la galaxia está representado por la multiplicación de una serie de factores astronómicos, biológicos y societales. El propio Drake considera que con buena aproximación la ecuación se puede reducir a N $\simeq$ 1,5 x *L*. En el caso analizado en la Sección 4, L_{Min} = 200 años. Por lo tanto, el mínimo número de civilizaciones tecnológicas presentes en la galaxia será del orden de N_{Min} = 300.

Suponiendo que todas las civilizaciones tecnológicas *N*, residen en un disco galáctico de radio R_g, y de espesor de H_g, la densidad galáctica de civilizaciones será descripta por la siguiente ecuación (Lemarchand 2000a):

$$\delta(N) = \frac{N}{\pi \times H_g \times R_g^2} = \frac{300}{\pi \times 0{,}6 \times 15^2} \text{civilizaciones} \times \text{kpc}^{-3} \cong 0{,}7 \text{ civilizaciones} \times \text{kpc}^{-3}$$

Aquí se ha asumido un valor de H_g = 0,6 kpc y R_g = 15 kpc. El último resultado propone un umbral mínimo de una civilización galáctica por cada 1,42 kpc^3. Un valor L_{min} ~ 200 años también implica que otras civilizaciones no deberían tener tiempo suficiente para desarrollar transmisores muy potentes, por lo que implícitamente se está infiriendo que este tipo de civilizaciones tendrían un nivel tecnológico similar al terrestre. Si estas civilizaciones galácticas estuvieran distribuidas de manera uniforme, pero al azar, la probabilidad de encontrar otra civilización galáctica en una esfera de radio *r* alrededor de la Tierra estará dada por:

$$P = 1 - e^{-\delta(N) \times \frac{4}{3} \times \pi \times r^3}$$

La mayor potencia equivalente de radiación isotrópica (EIRP) que dispone el planeta lo tiene el radar de Arecibo, en Puerto Rico ($EIRP_{Arecibo}$ ~ 2 x 10^{13} W). Se podría razonablemente suponer la existencia de una civilización galáctica de características similares a la terrestre que utilice transmisores de $EIRP_{ET}$ ~ 10^{14} W (la humanidad ya tiene la capacidad tecnológica como para

construir este tipo de transmisores). Teniendo en cuenta la sensibilidad actual de los equipos empleados en SETI, una observación desde el observatorio de Arecibo sería capaz de detectar una señal de 10^{14} W a una distancia $r \sim 1.4$ kpc.

Si se analiza el caso del observatorio ATA (350 antenas de 6 m cada una), éste sería capaz de detectar la misma señal desde una distancia $r \sim 0.35$ kpc. Si se asume que el observatorio terrestre se encuentra apuntando en la dirección correcta en el momento correcto (sincronización perfecta entre transmisión y recepción), las observaciones realizadas desde Arecibo tendrán una probabilidad P ~ 0.8 de detectar dichas señales, mientras que las posibilidades de ATA –ante las mismas condiciones de observación- será solo de P ~ 0,02.

Está claro que la hipótesis de una estrategia transmisión omnidireccional no es sustentable en el largo plazo. Por eso se hace imprescindible buscar nuevas estrategias para coordinar los regímenes de coordinación *a priori* entre las “transmisiones” y “recepciones” (Lemarchand, 1994).

Sólo las civilizaciones galácticas ubicadas a distancias < 0,02 kpc (~ 65 años luz) tienen la posibilidad de detectar señales de radio artificiales procedentes de la Tierra, y por lo tanto, en el presente, la humanidad solo tiene la capacidad de detectar hipotéticas “respuestas” de aquellas estrellas que se encuentran a distancias < 0,01 kpc. También se podría estar recibiendo señales de las civilizaciones tipo terrestres, que ya hubieran detectado planetas del tamaño de la Tierra, con instrumentos similares a la Misión Kepler, u otros observatorios espaciales que se encuentran en estado de construcción.

Si nuestra civilización terrestre es una civilización “típica” en la galaxia (Principio de Mediocridad) y si todas las civilizaciones pasan por la misma *Edad de Adolescencia Tecnológica*, al igual que la Tierra en el presente, entonces resulta lícito esperar que no existan simultáneamente más de 300 civilizaciones con capacidad comunicativa en la galaxia. Este hecho estaría de acuerdo con el resultado nulo, obtenido hasta el momento, durante más de 50 años de observaciones.

En 1959, Cocconi y Morrison finalizaban su artículo afirmando: “…la probabilidad de éxito de este tipo de investigación es muy reducida. Sin embargo, si nunca se lleva a cabo, ésta siempre será cero.” Medio siglo después, esta sentencia sigue teniendo una parsimoniosa validez.

6. Ejercicios:

- Utilizando los valores de potencia de transmisión y sensibilidad del observatorio de Arecibo, determine cuál será la distancia máxima desde la que se podría detectar una señal emitida desde una antena transmisora idéntica a la de Arecibo en la frecuencia de 6 GHz. Asuma una relación señal-ruido de SNR=3. Puede encontrar los detalles técnicos del observatorio en internet.
- Calcule cuál sería la probabilidad de detección de una señal de las características anteriores, si existieran 100.000 civilizaciones tecnológicas transmitiendo mensajes del descripto en el ejercicio anterior. Asuma una distribución homogénea de civilizacionesen la galaxia.

Agradecimientos

La redacción de este trabajo fue posible merced al apoyo recibido a través del *Programa de Ciencias Básicas e Ingeniería* de la Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe. Es importante señalar la constante contribución de *The Planetary Society* (EEUU) al programa de observación SETI del IAR. Los resultados de los estudios acerca de la Edad de Adolescencia Tecnológica fueron obtenidos mediante un subsidio otorgado por la *Foundation for the Future* (Bellevue, Washington EEUU).

Referencia

Billingham, J. y Oliver, B. *Project Cyclops: A Design Study of a System for Detecting Extraterrestrial Intelligent Life*, NASA CR 114445, Washington DC, US Government Printing Office, 1971.

Charnov, E. L. *Life History Invariants*, Oxford, Oxford University Press, 1993.

Clauset, A., Young, M. y Gleditsch, K.S. *Journal of Conflict Resolution*, vol. 51: 58. 2007.

Colomb, F.R. y Lemarchand, G.A. ¿Una aguja en el pajar cósmico? *Ciencia Hoy*, vol. 1 (5): 36-43, 1989.

Cordes, J., Lazio, J. y Sagan, C. Scintillation Induced Intermittency in SETI, *Astrophysical Journal*, vol. 487 (2): 782-808, 1997.

Drake, F.D., Wolfe, J.H. y Seeger, C.L. eds. *SETI Science Working Group Report*, NASA Technical Paper 2244, October 1983.

Ekers, R. D., Cullers, K. D., Billingham, J. y Scheffer, L.K., eds. *SETI 2020: A Roadmap for the Search for Extraterrestrial Intelligence*, Mountain View, SETI Press, 2002.

Gurney, W. S. C. y Nisbet, R. M. *Ecological Dynamics*, Oxford, Oxford University Press, 1998.

Hoerner, S. von. The Search for Signals from Other Civilizations, *Science*, vol. 134: 1839-1844, 1961.

Howard, A. W., Horowitz, P., Wilkinson, D.T., Coldwell, C.M., Groth, E.J., Jarosik, N., Latham, D.W., Stefanik, R.P., Willman, A.J., Wolff, J. y Zajac, J.M. Search for Nanosecond Optical Pulses from Nearby Solar-Type Stars, *The Astrophysical Journal*, vol. 613 (2): 1270-1284, 2004.

Howard, A. W., Horowitz, P., Coldwell, C.M., Stefanik, R.P., Gallicchio, J., Laumann, C. y Sliski, A. All Sky Optical SETI, accesible en http://frank.harvard.edu/~howard/papers/allsky_oseti_bremen.pdf , 2003.

Jensen, H. J. *Self-Organized Criticality*, Cambridge. Univ. Press, Cambridge, 1998.

Kapitza, S. P. The Phenomenological theory of the World Population Growth, *Physics-Uspekhi*, vol. 29: 57-71, 1996.

Kreifeldt, J. G. A Formulation for the number of Communicative Civilizations in the Galaxy, *Icarus*, vol. 14: 419-430, 1973.

Lemarchand, G. A. *El llamado de las estrellas*, Colección Lugar Científico, Buenos Aires, Lugar Editorial, 1992.

Lemarchand, G. A. Passive and Active SETI Strategies Using the Synchronization of SN1987A, *Astrophysics and Space Science*, vol. 214: 209-222, 1994a.

Lemarchand, G. A. Detectability of Extraterrestrial Technological Activities, *SETIquest*, vol.1 (1): 3-13, 1994b.

Lemarchand, G. A. Interplanetary and Interstellar Optical Communication Between Intelligent Beings: A Historical Approach, en S. A. Kingsley y G. A. Lemarchand, eds., The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI) in the Optical Spectrum II, , *SPIE Conference Proceedings*, vol. 2704:127-137, 1997.

Lemarchand, G. A. A Full-sky survey for ultra-narrowband artificial signals, en J. Chela Flores y F. Raulin, eds. *Exobiology: Matter, Energy and Information in the Origin and Evolution of Life in the Universe*, Dordrecht, Kluwer Acad. Pub., 1998a, pp. 339-346.

Lemarchand, G. A. Is there intelligent life out there? *Scientific American Presents* (Exploring Intelligence) vol. 9 (4): 96-104, 1998b.

Lemarchand, G. A. Detectability of Intelligent Life in the Universe: A Search based in our Knowledge of the Laws of Nature, en J. Chela Flores, G.A. Lemarchand y J. Oró, eds., *Astrobiology: Origins from Big Bang to Civilisation*, Dordrecht, Kluwer Acad. Pub., 2000a, pp.13-32.

Lemarchand, G. A. Speculations on the First Contact: Encyclopedia Galactica or the Music of the Spheres? en A. Tough, ed., *When SETI Succeeds: The Impact of High-Information Contact*, Bellevue, The Foundation for the Future, 2000b, pp.153-164.

Lemarchand, G. A. The Technological Adolescent Age Transition: A Boundary to Estimate the Last Factor of the Drake Equation. en R.P. Norris y F. H. Stootman, eds. *IAU Symposium 213: Bioastronomy 2002, Life Among the Stars*, A.S.P., San Francisco, 2004, pp.460-466.

Lemarchand, G. A. The Lifetime of Technological Civilizations en V. Burdyuzha ed., *The Future of Life and the Future of our Civilization,* Dordrecht, Springer, 2006, pp. 457-467.

Lemarchand, G. A. Review on Contact with Alien Civilizations: Our Hopes and Fears about Encountering Extraterrestrials, *Space Policy*, vol. 23: 188-190, 2007a.

Lemarchand, G. A. Defense R&D Policies: Fifty years of history, *Closing Address: International Network of Engineers and Scientists for Global Responsibility Meeting*, Berlín, 1-4 de junio de 2007b.

Lemarchand, G. A. The Lifetime of Technological Civilizations and their Impact on the Search Strategies en K. J. Meech, J. V. Keane, M. J. Mumma, J. L. Siefert, y D. J. Werthimer, eds., *ASP Conference Series*, Vol. 420: 393-401, 2009.

Lemarchand, G. A. Ciencia para la paz y en beneficio de la humanidad: El concepto del Juramento Hipocrático para Científicos, en G. A. Lemarchand, ed., Ciencia para la Paz y el Desarrollo, *Estudios y Documentos de Política Científica en ALC*, vol. 2, Montevideo, Oficina Regional de Ciencia de la Unesco para América latina y el Caribe, 2010, pp. 38-110.

Lemarchand, G. A., Beskin, G. M., Colomb, F. R. y Méndez, M. Radio and Optical SETI from the Southern Hemisphere, *SPIE Conference Proceedings*, vol. 1867: 138-154, 1993.

Lemarchand, G. A. y Lomberg, J. Universal Cognitive Maps and the Search for Intelligent Life in the Universe, *Leonardo*, vol. 42 (5): 396-402, 2009.

Mills, M. J., Toon, O. B., Turco, R. P., Kinnison, D. E. y García, R. R., Massive Global Ozone Loss Predicted following Regional Nuclear Conflict, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105 (14): 5307–5312, 2008.

Oliver, B. **M.** Proximity of Galactic Civilizations, *Icarus*, 25: 360-367, 1975.

Pearman, J. P. T. Extraterrestrial Intelligent Life and Interstellar Communication: an Informal Discussion en A. G. W. Cameron, ed., *Interstellar Communication: The Search for Extraterrestrial Life*, New York, W. A. Benjamin, 1963, pp. 287-293.

Sullivan, W.T., Brown, S. y Wetherill, C. Eavesdropping: The Radio Signature of the Earth, *Science,* vol. 199: 377-388, 1978.

Tarter, J. The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI), *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 39: 511-548, 2001.

The New York Times, "Einstein would use rays of light" p.24, Feb. 2, 1920.

Toon, O. B., Robock, A. y Turco, R. P. Environmental Consequences of Nuclear War, *Physics Today*, vol. 61 (12): 37-42, 2008.

Wallace, M. D., Crissey, B. L. y Sennot, L. I. Accidental Nuclear War: A Risk Assessment, *Journal of Peace Research*, vol. 23 (1): 9-27, 1986.

Como parte de la celebración del Año Internacional de Astronomía (IYA 2009) y del bicentenario del nacimiento de Charles Darwin, la Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe, en cooperación con varios departamentos de la Universidad de la República (UDELAR, Uruguay) organizaron la Segunda Escuela Iberoamericana de Astrobiología: Del Big Bang a las Civilizaciones. La misma se llevó a cabo en la ciudad Montevideo, Uruguay entre el 7 y 12 de septiembre de 2009.

Este evento fue patrocinado por la Organización de Estados Americanos (OEA), el Centro de Física Teórica Abdous Salam (ICTP) de Trieste; la Academia de Ciencias de los Países en Desarrollo (TWAS); el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR); Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de UDELAR; el Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA) y la Dirección de Innovación, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (DICYT) de Uruguay.

La escuela de graduados albergó a 70 estudiantes, en representación de unos 16 países de América Latina y el Caribe, brindándoles la oportunidad de tomar contacto con expertos internacionales en temas de vanguardia relacionados con la búsqueda de vida en el universo.

Este volumen reúne la mayoría de las clases presentadas durante la Escuela. Gran parte del material incluido es presentado por primera vez en idioma español y tiene por objetivo introducir a los estudiantes universitarios de la región, a temáticas que se encuentran en la frontera del conocimiento.















